



Tesis Doctoral

**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 TRÁFICOS LIGEROS**

(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)

Autor

JORGE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

Directores

DANIEL CASTRO FRESNO

MIGUEL ÁNGEL CALZADA PÉREZ



Santander, Mayo de 2008

RESUMEN

Los firmes permeables forman parte de la tendencia de construcción sostenible como uno de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) más completos. Los firmes permeables son secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, desde la superficie hasta la explanada, y en conjunto ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tráfico determinado. La clasificación de los firmes permeables se puede realizar atendiendo al tipo de pavimento permeable: discontinuos (adoquines con ranuras y césped o grava con refuerzos) o continuos (mezcla bituminosa porosa y hormigón poroso); o atendiendo a la gestión que se realice del agua infiltrada: infiltración al terreno, almacenamiento o drenaje diferido. Los principales inconvenientes de los firmes permeables son dos: la colmatación que pone en peligro su funcionalidad y la degradación de los materiales que amenaza su durabilidad. Las secciones de firmes permeables propuestas se han obtenido como combinación de dos tipos de pavimentos permeables: adoquines y mezcla bituminosa porosa; con dos tipos de áridos empleados en las capas granulares inferiores: caliza de cantera y reciclado de residuos de construcción y demolición. Para estudiar la capacidad de infiltración en laboratorio, se ha desarrollado el ensayo de resistencia a la colmatación con el Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF). Este ensayo es una herramienta eficaz para la caracterización de diferentes tipos de pavimentos permeables, exponiéndolos a un aporte conocido de agua, variando el estado de colmatación y la inclinación de la superficie. De los resultados obtenidos del ensayo de pavimentos de adoquines con ranuras se extrae que la geometría de las mismas debe ser estrecha y alargada para que actúen a modo de tamiz impidiendo la entrada del sedimento al firme permeable. Con todo, una vez el sedimento ha sido compactado en el interior de las ranuras, es muy difícil recuperar la capacidad de infiltración del pavimento mediante un barrido superficial. Por su parte, el pavimento de mezcla bituminosa porosa debe asegurar una permeabilidad creciente con la profundidad, con la superficie a modo de filtro evitando la colmatación en profundidad. De este modo el barrido superficial permite recuperar la permeabilidad inicial del asfalto poroso. Además, para estudiar la capacidad de infiltración en campo, se ha desarrollado el Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP), el cual permite identificar claramente cualquier tipo de superficie, permeable o impermeable, así como su capacidad de infiltración. Respecto a la degradación de los materiales, se ha analizado la afección de los vertidos de hidrocarburos sobre mezclas bituminosas porosas fabricadas con distintos tipos de betunes. Así, los resultados indican que un betún modificado con polímeros asegura una adecuada resistencia a los derrames de hidrocarburos medios. Por último, los modelos de firmes permeables construidos en el Laboratorio (FIDICA), en el Campus de Santander de la Universidad de Cantabria y en el aparcamiento experimental de la Guía en Gijón, han permitido comprobar como los pavimentos de mezcla bituminosa porosa combinados con áridos reciclados ofrecen una mayor laminación que el resto de secciones ensayadas. Con todo, el diseño de los firmes permeables debe realizarse acorde a su ubicación, ejecutándose con el mayor control de calidad posible y llevándose a cabo un mantenimiento adecuado para maximizar su vida útil.

ABSTRACT

Pervious pavements are part of the trend of sustainable construction as one of the most complete Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). Pervious pavements are made up of several layers of construction materials that allow the passage of water through them, from surface to foundation, and on the whole offer the necessary bearing capacity to resist certain traffic. The classification of pervious pavements can be carried out attending to the surface type: permeable (concrete blocks and reinforced grass or gravel) or porous (porous asphalt and porous concrete); or attending to the infiltrated water management: infiltration to subsoil, storage or differed drainage. The pervious pavements main inconveniences are two: clogging, that endangers functionality, and materials degradation, that threatens durability. The new proposed pervious pavements sections have been obtained as a combination of two surface types: concrete blocks and porous asphalt; with two aggregate types used in the lower layers: quarry limestone and recycled from construction and demolition waste. The clogging resistance test with the Fixed Cantabrian Infiltrometer (FCI) has been developed to study the infiltration capacity in laboratory. The FCI is an effective tool for the characterization of different pervious pavements types, exposed to a known contribution of water, varying clogging conditions and slope. From the results obtained, it is observed that the best paving block geometry is the one with narrow and long slots, acting like a sieve, avoiding the silt entrance. Even this way, when the silt is compacted inside the slots, it is very difficult to recover the infiltration capacity of the pavement. On the other hand, the appropriate design of a pavement with porous asphalt is the one that guarantees a growing permeability with depth, with the surface as a filter to avoid the blockage in depth. In this way, the superficial sweeping allows recovering the initial permeability. The Portable Cantabrian Infiltrometer (PCI) has been developed to study the infiltration capacity in field. The PCI allows clearly identifying any type of surface, pervious or impervious, as well as its clogging level. Regarding the materials degradation, the affection of hydrocarbons leakages over porous asphalt has been analysed. The results indicate that an asphalt binder modified with polymers ensures a correct resistance to the expected hydrocarbons spills. Lastly, models of pervious pavements have been built in the FIDICA Laboratory and in the Santander Campus of the University of Cantabria, besides several experimental parking bays in La Guía, Gijón. These models have allowed to check how the porous asphalt pavements combined with recycled aggregates offer a greater lamination than the rest of the tested sections. Nevertheless, the design of pervious pavements should be specifically carried out for each location, being performed with the greatest possible quality control and counting with the appropriate maintenance to maximize their life span.

AGRADECIMIENTOS

Muchas gracias a todas las personas que me han ayudado.

La realización de esta tesis ha sido posible gracias al proyecto de investigación “Desarrollo de nuevas estructuras de firmes filtrantes biodegradantes de hidrocarburos (FIDICA)”, con referencia REN2003-05278/TECNO, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia con fondos del PGE (Presupuesto General del Estado) y del FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

Gracias a la Universidad de Cantabria por gestionar el proyecto, a la Universidad de Coventry por su apoyo y orientación, y a la Universidad de Oviedo por su colaboración.

Gracias al Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

Gracias al Ayuntamiento de Gijón por su confianza y a las empresas: Hanson-Formpave y Bloques Montserrat por los adoquines; Repsol YPF por los betunes; Polyfelt, Terratest, Danosa y Fibertext por los geotextiles; Emilio Bolado, Arruti y Ascan por la mezcla bituminosa y los áridos; Bizkaiko Txintxor Berziklategia (BTB) por los áridos reciclados; y Atlantis por las celdas de plástico.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thank you to all people that have helped me.

The realization of this thesis has been possible thanks to the research project “Development of new structures of pavements for the biodegradation of hydrocarbons (FIDICA)” which counted with the financing of the Ministry of Education and Science with funds from the SGB (State General Budget) and from the ERDF (European Regional Development Fund), with reference REN2003-05278/TECNO.

Thanks to the University of Cantabria for managing the research project, to Coventry University for their support and orientation, and to University of Oviedo for their collaboration.

Thanks to the Roads Laboratory of the Civil Engineering School in Santander.

Thanks to the City council of Gijón for their support, and to the companies: Hanson-Formpave and Bloques Montserrat for the paving concrete blocks; Repsol YPF for the asphaltic binders; Polyfelt, Terratest, Danosa and Fibertext for the geotextiles; Emilio Bolado, Arruti and Ascan for the asphalt and the limestone aggregates, Bizkaiko Txintxor Berziklategia (BTB) for the recycled aggregates; and Atlantis for the plastic cells.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<i>Índice de contenidos</i>	V
<i>Índice de figuras</i>	XI
<i>Índice de tablas</i>	XIX
CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN	1
I.1 Marco de la tesis	2
I.1.1 Antecedentes.....	2
I.1.2 Estructura del documento	3
I.2 Objetivos e hipótesis	4
I.2.1 Generales	4
I.2.2 Particulares	5
I.3 Drenaje sostenible	6
I.3.1 Desarrollo sostenible y construcción.....	6
I.3.2 Agua de lluvia en las ciudades	7
I.3.2.1 Cantidad.....	7
I.3.2.2 Servicio.....	9
I.3.3 Soluciones sostenibles de drenaje	11
I.3.3.1 Corrientes de pensamiento	11
I.3.3.2 Ventajas del drenaje sostenible	13
I.3.3.3 Inconvenientes del drenaje sostenible	15
I.4 Técnicas de drenaje sostenible	18
I.4.1 Clasificaciones.....	18
I.4.2 Medidas preventivas.....	24
I.4.2.1 Legislación	24
I.4.2.2 Formación.....	25
I.4.2.3 Inversión.....	25
I.4.3 Sistemas de infiltración	26
I.4.3.1 Superficies permeables.....	26
I.4.3.2 Pozos y zanjas de infiltración.....	26
I.4.3.3 Depósitos de infiltración	26
I.4.4 Sistemas de captación y transporte.....	27
I.4.4.1 Drenes filtrantes.....	27
I.4.4.2 Cunetas verdes.....	27

I.4.4.3	Franjas filtrantes.....	27
I.4.5	Sistemas de almacenamiento.....	28
I.4.5.1	Depósitos de detención	28
I.4.5.2	Estanques de retención.....	28
I.4.5.3	Humedales artificiales.....	28
I.4.6	La cadena de drenaje sostenible.....	29
CAPÍTULO II.- ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE		31
II.1	Firmes permeables.....	32
II.1.1	Antecedentes	32
II.1.2	Definición y aplicación	34
II.1.3	Clasificación	35
II.1.4	Ventajas.....	39
II.1.5	Inconvenientes	42
II.2	Secciones permeables	44
II.2.1	Pavimentos permeables.....	44
II.2.1.1	Césped o grava con refuerzos	44
II.2.1.2	Adoquines con ranuras.....	46
II.2.1.3	Mezcla bituminosa porosa	47
II.2.1.4	Hormigón poroso	49
II.2.2	Capas inferiores de firmes permeables	51
II.2.2.1	Capas granulares	51
II.2.2.2	Estructuras de plástico	52
II.2.2.3	Geosintéticos.....	53
II.3	Problemas de colmatación	54
II.3.1	Características generales.....	54
II.3.2	Análisis en laboratorio	57
II.3.3	Análisis en campo	60
II.4	Problemas de degradación.....	63
II.4.1	Acción del agua.....	63
II.4.2	Esfuerzos tangenciales	65
II.4.3	Acción de los vertidos.....	67
II.5	Elección de secciones permeables.....	71
II.5.1	Experiencias previas	71
II.5.2	Análisis de espesores	75
II.5.3	Elección final	77
CAPÍTULO III.- METODOLOGÍAS		79

III.1	Ensayo de resistencia a la colmatación en laboratorio.....	80
III.1.1	Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF).....	80
III.1.2	Preparación de muestras	84
III.1.2.1	Geometrías de adoquines con ranuras.....	86
III.1.2.2	Adoquín con ranuras seleccionado	90
III.1.2.3	Mezcla bituminosa porosa	92
III.1.3	Condiciones de colmatación	95
III.1.3.1	Geometrías de adoquines con ranuras.....	96
III.1.3.2	Adoquín con ranuras seleccionado	98
III.1.3.3	Mezcla bituminosa porosa	100
III.1.4	Ensayo de resistencia a la colmatación	102
III.2	Ensayos de capacidad de infiltración en campo.....	104
III.2.1	Permeámetro LCS (Laboratorio de Caminos de Santander).....	104
III.2.2	Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP).....	105
III.2.3	Pavimentos ensayados.....	108
III.2.4	Ensayo de infiltración con el LCS	109
III.2.5	Ensayo de infiltración con el ICP	110
III.3	Ensayos de resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos.....	114
III.3.1	Materiales y dosificación	114
III.3.2	Caracterización de las mezclas	116
III.3.3	Tipo de vertido simulado	124
III.3.4	Ensayo de escurrimiento	126
III.3.5	Ensayo de semi-inmersión	128
III.4	Ensayo de funcionalidad de firmes permeables	130
III.4.1	Ubicación y materiales.....	130
III.4.2	Construcción de los modelos	137
III.4.2.1	Modelos de Laboratorio	137
III.4.2.2	Modelos del Campus.....	139
III.4.2.3	Modelos de Gijón.....	141
III.4.3	Aportaciones de agua	144
III.4.4	Ensayo de reacción y respuesta.....	148
CAPÍTULO IV.-	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	151
IV.1	Resistencia a la colmatación de distintas geometrías de adoquines con ranuras	152
IV.1.1	Superficie recién colocada.....	152
IV.1.2	Superficie semi-colmatada	158

IV.1.3	Superficie colmatada al máximo	163
IV.1.4	Selección de la geometría de adoquín óptima	168
IV.1.5	Conclusiones parciales	177
IV.2	Resistencia a la colmatación de pavimentos permeables	178
IV.2.1	Adoquines con ranuras	178
IV.2.1.1	Superficie recién colocada	178
IV.2.1.2	Superficie semi-colmatada	181
IV.2.1.3	Superficie colmatada	183
IV.2.1.4	Superficie colmatada al máximo	186
IV.2.1.5	Superficie colmatada al máximo con mantenimiento	188
IV.2.2	Mezcla bituminosa porosa.....	192
IV.2.2.1	Superficie recién colocada	192
IV.2.2.2	Superficie colmatada al máximo	197
IV.2.2.3	Superficie colmatada al máximo con mantenimiento	200
IV.2.3	Comparación	204
IV.2.4	Conclusiones parciales	213
IV.3	Capacidad de infiltración en campo	214
IV.3.1	Infiltración con el permeámetro LCS.....	214
IV.3.2	Infiltración con el ICP	216
IV.3.3	Comparación	218
IV.3.4	Conclusiones parciales	220
IV.4	Resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos.....	221
IV.4.1	Ensayos de escurrimiento.....	221
IV.4.2	Ensayos de semi-inmersión	225
IV.4.3	Conclusiones parciales	229
IV.5	Funcionalidad de firmes permeables	230
IV.5.1	Modelos del Laboratorio	230
IV.5.2	Modelos del Campus	236
IV.5.3	Modelos de Gijón	237
IV.5.4	Conclusiones parciales	249
CAPÍTULO V.-	CONCLUSIONES	251
V.1	Recomendaciones para el proyecto y construcción de firmes permeables	252
V.1.1	Proyecto de firmes permeables.....	252
V.1.1.1	Ajuste de la tipología.....	253
V.1.1.2	Diseño de la funcionalidad	255

V.1.1.3	Comprobación de la durabilidad.....	257
V.1.2	Construcción de firmes permeables.....	258
V.1.2.1	Materiales.....	258
V.1.2.2	Control de calidad.....	261
V.1.2.3	Mantenimiento.....	262
V.2	Conclusiones.....	264
V.2.1	Particulares.....	264
V.2.2	Generales.....	266
V.3	Futuras líneas de investigación.....	267
	<i>EXTENDED ABSTRACT.....</i>	269
1	Introduction.....	270
1.1	Framework and overview.....	270
1.2	Objectives and hypothesis.....	271
1.3	Sustainable drainage.....	272
2	Literature review.....	273
2.1	Pervious pavements.....	273
2.2	Clogging.....	274
2.3	Degradation.....	275
2.4	Permeable sections.....	276
3	Methodologies.....	277
3.1	Test of infiltration capacity in laboratory.....	277
3.2	Tests of infiltration capacity in field.....	281
3.3	Tests of porous asphalt resistance to hydrocarbons leakages.....	284
3.4	Test of permeable pavements functionality.....	287
4	Discussion of the results.....	290
4.1	Infiltration capacity in laboratory: different concrete block geometries 290	
4.2	Infiltration capacity in laboratory: concrete blocks and porous asphalt 291	
4.3	Infiltration capacity in field of different pavements.....	292
4.4	Porous asphalt resistance to hydrocarbons leakages.....	293
4.5	Permeable pavements construction and functionality.....	294
5	Conclusions.....	295
5.1	Particular and general conclusions.....	295
5.2	Future research.....	296
	<i>REFERENCIAS.....</i>	299

ANEXOS.....	319
Anexo 1: Resistencia a la colmatación de distintas geometrías de adoquines	
con ranuras.....	321
Geometrías de adoquines con ranuras	322
Resultados de los ensayos	333
Anexo 2: Resistencia a la colmatación de pavimentos permeables.....	339
Adoquines con ranuras	340
Ajustes del simulador de lluvia y escorrentía.....	340
Resultados de los ensayos	341
Análisis de regresión	344
Mezcla bituminosa porosa.....	354
Ajustes del simulador de lluvia y escorrentía.....	354
Resultados de los ensayos	356
Análisis de regresión	362
Anexo 3: Capacidad de infiltración en campo.....	373
Resultados con el LCS	374
Resultados con el ICP.....	375
Anexo 4: Resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de	
hidrocarburos.....	383
Resultados con el betún convencional B 60/70.....	384
Resultados con el betún modificado BM-3b	387
Resultados con el betún anticarburante BAC.....	390
Análisis de regresión	392
Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables.....	395
Fotografías de la construcción de los modelos.....	396
Resultados con los modelos del Laboratorio.....	410
Resultados con los modelos del Campus	431
Resultados con los modelos de Gijón.....	435

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1. Superficie impermeable con un deficiente diseño de drenaje.	10
Figura II-1. Césped con refuerzos de hormigón, aparcamiento de la playa de Loredo, Cantabria.	45
Figura II-2. Césped con refuerzos de plástico, aparcamiento del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón, Asturias.	45
Figura II-3. Adoquines de Bloques Montserrat con ranuras libres, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander.	46
Figura II-4. Mezcla bituminosa porosa, Laboratorio de Caminos de Santander.	48
Figura II-5. Hormigón poroso hidráulico, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander.	49
Figura II-6. Subbase de estructuras de plástico de Permavoid Limited (2008).	52
Figura II-7. Secciones de firmes urbanos con adoquines (Manchón <i>et al.</i> , 2000).	76
Figura II-8. Secciones de firmes de pavimentos urbanos con mezcla bituminosa (Manchón <i>et</i> <i>al.</i> , 2000).	76
Figura II-9. Espesores de las secciones tipo de firme permeable objeto de análisis experimental.	78
Figura III-1. Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF).	81
Figura III-2. Simulador de escorrentía y simulador de lluvia del ICF.	83
Figura III-3. Construcción de la muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación del geotextil de asiento.	85
Figura III-4. Construcción de la muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación de la base granular nivelada.	85
Figura III-5. Construcción de la muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación de los adoquines y sellado perimetral.	89
Figura III-6. Adoquín para pavimentos permeables de Bloques Montserrat.	90
Figura III-7. Ensayo de resistencia a la rotura de los adoquines (UNE-EN 1338, 2004). ..	91
Figura III-8. Caracterización de una probeta de mezcla bituminosa porosa antes de su ensayo en el ICF.	92
Figura III-9. Construcción de una muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación de la mezcla bituminosa porosa y sellado perimetral.	94
Figura III-10. Granulometría del sedimento empleado para simular la colmatación en todos los ensayos realizados con el ICF (Davies <i>et al.</i> , 2002).	95
Figura III-11. Etapas de la simulación de la colmatación de un pavimento de adoquines mediante el relleno de las ranuras con sedimento.	97
Figura III-12. Pavimento de adoquines con ranuras colmatado al máximo.	99

Figura III-13. Pavimento de mezcla bituminosa porosa bajo los tres escenarios de colmatación simulados: recién colocado, colmatado y colmatado con mantenimiento.	101
Figura III-14. Ensayos de pavimentos permeables de adoquines con ranuras y de mezcla bituminosa porosa en el ICF.	103
Figura III-15. Permeámetro del LCS (Laboratorio de Caminos de Santander).	104
Figura III-16. Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP)	105
Figura III-17. Ajustes de la intensidad de lluvia simulada según el nivel de agua en la cámara de carga para los dos simuladores de lluvia empleados con el ICP.	107
Figura III-18. Situación de los puntos ensayados con el permeámetro LCS en el caso de superficies de césped reforzado y adoquines con ranuras.	109
Figura III-19. Situación de las tres áreas de ensayo con el ICP en la carretera CA-231, Santander.	111
Figura III-20. Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para Santander y Gijón (AEMET).	112
Figura III-21. Almacenamiento de los áridos ofíticos empleados para la fabricación de mezcla bituminosa porosa en seis fracciones de tamaños: 20/12,5; 12,5/8; 8/4; 4/2; 2/0,5 y 0,5/0,063 mm.	115
Figura III-22. Permeámetro de carga variable utilizado en el laboratorio para la determinación de la permeabilidad de las probetas de mezcla bituminosa porosa.	117
Figura III-23. Máquina de los Ángeles empleada en el ensayo cántabro y distintos desgastes resultantes en probetas Marshall de mezcla bituminosa porosa.	118
Figura III-24. Diagrama de cajas de la variable porcentaje de huecos medida en todas las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún.	120
Figura III-25. Diagrama de cajas de la variable permeabilidad medida en todas las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún.	121
Figura III-26. Diagrama de cajas de la variable desgaste medida en las probetas control de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún.	122
Figura III-27. Ensayo de inmersión completa de probetas de mezcla bituminosa porosa en agua con hidrocarburos.	124
Figura III-28. Ensayo de escurrimiento de agua con hidrocarburos a través de probetas de mezcla bituminosa porosa.	126
Figura III-29. Ensayo simultáneo de varias series de probetas de mezcla bituminosa porosa mediante la metodología de escurrimiento de agua con hidrocarburos.	127
Figura III-30. Ensayo de semi-inmersión de probetas de mezcla bituminosa porosa en agua con hidrocarburos.	128
Figura III-31. Ensayo simultáneo de varias series de probetas de mezcla bituminosa porosa mediante la metodología de semi-inmersión en agua con hidrocarburos.	129
Figura III-32. Adoquines empleados en la construcción de los modelos de firmes permeales del Laboratorio, del Campus y de Gijón.	133

Figura III-33. Mezcla bituminosa empleada en la construcción de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.....	133
Figura III-34. Granulometrías de los áridos calizos empleados en la construcción de las capas subbase de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.	134
Figura III-35. Granulometrías de los áridos reciclados empleados en la construcción de las capas subbase de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.....	135
Figura III-36. Granulometrías de los áridos calizos empleados en la construcción de las capas base de los modelos de firmes permeables con superficie de adoquines con ranuras del Laboratorio, del Campus y de Gijón.	136
Figura III-37. Secciones de firmes permeables construidas en el Laboratorio FIDICA...	137
Figura III-38. Etapas de la construcción de los modelos de firmes permeables del Laboratorio FIDICA.	138
Figura III-39. Modelos de firmes permeables del Campus de la Universidad de Cantabria, Santander.	139
Figura III-40. Etapas de la construcción de los modelos de firmes permeables del Campus de Santander.	140
Figura III-41. Modelos de firmes permeables o plazas experimentales del aparcamiento del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón.	141
Figura III-42. Secciones de firmes permeables construidas en el aparcamiento experimental del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón.	142
Figura III-43. Sistema de recogida del efluente de agua infiltrada a través de los firmes permeables del aparcamiento experimental de la Guía, Gijón.	143
Figura III-44. Etapas de la construcción de los modelos de firmes permeables de Gijón en el aparcamiento experimental de la Guía.....	143
Figura III-45. Simuladores de lluvia empleados con los modelos de firmes permeables del Laboratorio FIDICA.	145
Figura III-46. Ajuste del volumen precipitado con los simuladores de lluvia empleados en el Laboratorio FIDICA en función del tiempo.	146
Figura III-47. Aportación de agua artificial o precipitación simulada sobre una plaza experimental de firme permeable del aparcamiento de la Guía, Gijón.	147
Figura III-48. Equipamiento completo del ensayo de reacción y respuesta en el Laboratorio FIDICA.	149
Figura IV-1. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B1 (hueco romboidal) recién colocado.....	153
Figura IV-2. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B2 (hueco circular) recién colocado.....	154

Figura IV-3. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B3 (hueco cuadrado) recién colocado.	156
Figura IV-4. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B4 (hueco elíptico) recién colocado.	157
Figura IV-5. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B1 (hueco romboidal) semi-colmatado.	159
Figura IV-6. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B2 (hueco circular) semi-colmatado.	160
Figura IV-7. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B3 (hueco cuadrado) semi-colmatado.	161
Figura IV-8. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B4 (hueco elíptico) semi-colmatado.	162
Figura IV-9. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B1 (hueco romboidal) colmatado.	164
Figura IV-10. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B2 (hueco circular) colmatado.	165
Figura IV-11. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B3 (hueco cuadrado) colmatado.	166
Figura IV-12. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B4 (hueco elíptico) colmatado.	167
Figura IV-13. Porcentajes totales infiltrados con cada tipo de adoquín recién colocado para cada una de las inclinaciones ensayadas.	169
Figura IV-14. Porcentajes totales infiltrados con cada tipo de adoquín semi-colmatado para cada una de las inclinaciones ensayadas.	170
Figura IV-15. Porcentajes totales infiltrados con cada tipo de adoquín colmatado para cada una de las inclinaciones ensayadas, ponderados en función de la cantidad de sedimento empleada.	172
Figura IV-16. Granulometrías del sedimento sobrante de la simulación de la colmatación con cada tipo de adoquín ensayado.	173
Figura IV-17. Geometría del adoquín con ranuras seleccionada como óptima.	176
Figura IV-18. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras recién colocado.	179
Figura IV-19. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras recién colocado.	180
Figura IV-20. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras semi-colmatado.	181

Figura IV-21. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras semi-colmatado.....	182
Figura IV-22. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas.	184
Figura IV-23. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas.....	185
Figura IV-24. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo.	186
Figura IV-25. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo.....	187
Figura IV-26. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo con mantenimiento.....	189
Figura IV-27. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo con mantenimiento.....	190
Figura IV-28. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 1, 2 y 3).....	193
Figura IV-29. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 1, 2 y 3).....	194
Figura IV-30. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 4, 5 y 6).....	195
Figura IV-31. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 4, 5 y 6).....	196
Figura IV-32. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo.....	198
Figura IV-33. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo.	199

Figura IV-34. Ajustes del sedimento retenido tras el barrido de las probetas de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo en función de los huecos de la misma.	200
Figura IV-35. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo con mantenimiento.....	201
Figura IV-36. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo con mantenimiento.	202
Figura IV-37. Porcentajes totales infiltrados para cada inclinación de los pavimentos permeables de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa recién colocados.	205
Figura IV-38. Porcentajes totales infiltrados para cada inclinación de los pavimentos permeables de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa con una carga de sedimento de 2 kg/m ²	206
Figura IV-39. Porcentaje de infiltración en función de la distancia desde la línea de entrada de la escorrentía superficial y de la carga de sedimento sobre la superficie para un pavimento de adoquines con ranuras con una inclinación del 2%.	211
Figura IV-40. Porcentaje de infiltración en función de la distancia desde la línea de entrada de la escorrentía superficial y de la carga de sedimento sobre la superficie para un pavimento de mezcla bituminosa porosa con una inclinación del 2%.	212
Figura IV-41. Tiempos de infiltración medidos con el permeámetro LCS sobre los diferentes pavimentos ensayados (Tabla III-8).	215
Figura IV-42. Alturas de inundación medidas con el ICP para cada periodo de retorno sobre los diferentes pavimentos ensayados (Tabla III-8).....	216
Figura IV-43. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún sometidas al escurrimiento de agua con aceite usado de motor.	222
Figura IV-44. Ajustes del porcentaje desgaste en el ensayo cántabro en función de los huecos de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con betún convencional B 60/70 para los cuatro niveles de vertido de aceite usado de motor ensayados a escurrimiento.	224
Figura IV-45. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún sometidas a semi-inmersión con un Nivel 3 de vertido de cada tipo de hidrocarburo.....	226
Figura IV-46. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con el betún BM-3b sometidas a semi-inmersión con un Nivel 4 de vertido de cada tipo de hidrocarburo.....	227

Figura IV-47. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con el betún BAC sometidas a semi-inmersión con un Nivel 5 de vertido de cada tipo de hidrocarburo.	227
Figura IV-48. Evolución a lo largo del tiempo de los promedios de los tiempos de reacción de cada sección tipo de firme permeable del Laboratorio.	231
Figura IV-49. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BR del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.	233
Figura IV-50. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.	233
Figura IV-51. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PA del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.	234
Figura IV-52. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.	234
Figura IV-53. Evolución a lo largo del tiempo de los promedios de los porcentajes de infiltración al cabo de 48 horas de la simulación de lluvia para cada sección tipo de firme permeable del Laboratorio.	235
Figura IV-54. Respuesta de cada sección tipo de firme permeable del Campus expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de la hora y media posterior a la simulación de lluvia.	236
Figura IV-55. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BR de Gijón (plaza 6) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/1).	238
Figura IV-56. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/3).	239
Figura IV-57. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 2/3).	240
Figura IV-58. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 3/3).	240
Figura IV-59. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PA de Gijón (plaza 12) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/1).	241

Figura IV-60. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/4).....	243
Figura IV-61. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 2/4).....	243
Figura IV-62. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 3/4).....	244
Figura IV-63. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 4/4).....	244
Figura IV-64. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BR de Gijón (plaza 6) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.....	246
Figura IV-65. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.....	246
Figura IV-66. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PA de Gijón (plaza 12) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.....	247
Figura IV-67. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.....	247
Figura IV-68. Plazas de aparcamiento experimentales construidas con firmes permeables ocupadas por vehículos ligeros, aparcamiento público del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón.....	248

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1. Clasificación propuesta de técnicas de drenaje sostenible.	23
Tabla II-1. Clasificación propuesta de firmes permeables.	38
Tabla II-2. Granulometría de relleno drenante nº 78 recogida en la norma ASTM D448-03a (2003).	61
Tabla II-3. Secciones de firmes permeables (del Val Melús, 1990).	71
Tabla II-4. Secciones tipo de firmes permeables objeto de análisis experimental.	78
Tabla III-1. Adoquines con ranuras con las cuatro geometrías seleccionadas para su estudio en laboratorio con el Infiltrómetro Cántabro Fijó (ICF).	86
Tabla III-2. Parámetros de caracterización de la capacidad de infiltración de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras.	87
Tabla III-3. Parámetros de caracterización de la capacidad portante de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras.	87
Tabla III-4. Parámetros de caracterización de estética y comodidad de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras.	88
Tabla III-5. Resultados de los ensayos de resistencia a la rotura según la norma UNE-EN 1338 (2004) del adoquín con ranuras elípticas fabricado en serie.	91
Tabla III-6. Características de las probetas de mezcla bituminosa porosa a ensayar con el ICF.	93
Tabla III-7. Tiempos de infiltración obtenidos con el permeámetro LCS sobre las probetas de mezcla bituminosa a ensayar con el ICF.	93
Tabla III-8. Pavimentos urbanos ensayados con el permeámetro LCS y con el Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP) para evaluar su capacidad de infiltración.	108
Tabla III-9. Intensidades de lluvia tomadas como referencia para el ensayo con el ICP correspondientes a aguaceros de cinco minutos de duración con periodos de retorno de 10, 50 y 500 años en Santander y Gijón.	113
Tabla III-10. Alturas de inundación medidas con el ICP sobre una placa metálica.	113
Tabla III-11. Granulometrías empleadas para la fabricación con distintos betunes de las probetas Marshall de mezcla bituminosa porosa para los ensayos de resistencia a los vertidos de hidrocarburos.	115
Tabla III-12. Promedios de las variables huecos, permeabilidad y desgaste de las probetas control de mezcla bituminosa porosa fabricada con cada tipo de betún.	122
Tabla III-13. Niveles de vertido de hidrocarburos ensayados sobre mezclas bituminosas porosas.	125
Tabla III-14. Espesores de las distintas capas de los firmes permeables construidos en el Laboratorio, en el Campus y en Gijón.	131

Tabla III-15. Materiales empleados en la construcción de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.....	132
Tabla III-16. Simulaciones de lluvia o aportaciones de agua artificiales realizadas en el Laboratorio, en el Campus y en Gijón.....	144
Tabla IV-1. Cantidad de sedimento empleada para la simulación de la colmatación máxima en cada una de las geometrías de adoquines con ranuras ensayadas.	171
Tabla IV-2. Obtención del parámetro de resistencia a la colmatación (RC) de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras ensayadas.....	174
Tabla IV-3. Parámetros de caracterización y promedio de comparación de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras estudiadas.	175
Tabla IV-4. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras recién colocado.	180
Tabla IV-5. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras semi-colmatado.....	183
Tabla IV-6. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas.	185
Tabla IV-7. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo.	188
Tabla IV-8. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo con mantenimiento.....	191
Tabla IV-9. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 1, 2 y 3).....	194
Tabla IV-10. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 4, 5 y 6).....	197
Tabla IV-11. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo.....	199
Tabla IV-12. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo con mantenimiento.	203
Tabla IV-13. Obtención del parámetro de resistencia a la colmatación (RC) de pavimentos permeables de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa.....	207

Tabla IV-14. Longitud de máximo drenaje del pavimento de adoquines con ranuras para cada estado de colmatación e inclinación de la superficie.	208
Tabla IV-15. Longitud de máximo drenaje del pavimento de mezcla bituminosa porosa para cada estado de colmatación e inclinación de la superficie.....	208
Tabla IV-16. Ajustes propuestos para explicar el porcentaje infiltrado medido con el ICF (I) en función de la distancia desde la línea de entrada de la escorrentía superficial (d), la carga de sedimento sobre la superficie (s) y la inclinación del pavimento (i).....	210
Tabla IV-17. Promedios de las medidas realizadas con el permeámetro LCS y con el ICP sobre los distintos pavimentos ensayados (Tabla III-8).	218
Tabla IV-18. Ajustes del porcentaje de desgaste en el ensayo cántabro (D) de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricada con cada tipo de betún en función del nivel de vertido (N) con la metodología de escurrimiento de agua con hidrocarburos.	223
Tabla IV-19. Ajustes del porcentaje de desgaste en el ensayo cántabro (D) de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricada con betún convencional B 60/70 en función del porcentaje de huecos (H) para cada nivel de vertido de hidrocarburos ensayado con la metodología de escurrimiento.....	224
Tabla IV-20. Promedios de desgaste en el ensayo cántabro de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún ensayadas en seco y con la metodología de escurrimiento con vertidos de Nivel 0 y Nivel 3 de aceite usado de motor.....	225
Tabla IV-21. Promedios de desgaste en el ensayo cántabro de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún ensayadas en seco y con la metodología de semi-inmersión con vertidos de Nivel 0 y Nivel 3 de aceite usado de motor.....	228
Tabla V-1. Ficha de recogida de información propuesta para el diseño de firmes permeables.	252

CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN

I.1 MARCO DE LA TESIS

I.1.1 ANTECEDENTES

El desarrollo sostenible y su aplicación a la construcción son fundamentales hoy en día en el sector de la ingeniería civil. Dentro de la amplia variedad de procedimientos constructivos sostenibles, los sistemas de drenaje sostenible en general, y las secciones permeables de firmes en particular, son de gran importancia para mejorar la gestión del agua, recurso indispensable para el desarrollo humano.

La línea de investigación sobre Construcción de Sistemas de Drenaje Sostenible fue introducida en España en el año 2003 por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria, con la colaboración de la Universidad de Coventry del Reino Unido. El desarrollo y continuación de esta línea de investigación ha sido posible gracias a la colaboración del Laboratorio de Caminos de la Universidad de Cantabria.

Dentro de esta línea de investigación se han desarrollado varios proyectos entre los que destaca el Proyecto de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico del Ministerio de Educación y Ciencia REN2003-05278/TECNO, titulado: “Desarrollo de nuevas estructuras de firmes filtrantes biodegradantes de hidrocarburos (FIDICA)”. También en esta línea, GITECO ha desarrollado diversos proyectos de transmisión de resultados científicos e innovación cofinanciados por el Plan Estratégico de Desarrollo Tecnológico de Cantabria y diferentes empresas del sector de la construcción. Entre ellos destacan los titulados: “Desarrollo de adoquines para pavimentos permeables”, en colaboración con la empresa Bloques Montserrat, y “Desarrollo de mezclas bituminosas para pavimentos permeables”, en colaboración con la constructora Emilio Bolado. La presente tesis, “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”, es fruto de los proyectos de investigación mencionados anteriormente.

Actualmente, como continuación de la línea de investigación, se está desarrollando el Proyecto de I+D del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica CTM2006-00310: “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)”; así como varios proyectos más en colaboración con diferentes empresas: Hanson-Formpave, SIEC, Contratas Iglesias, etc.

1.1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento comienza con el resumen de la tesis y los agradecimientos, tanto en español como en inglés, seguidos de los índices de contenidos, figuras y tablas. A continuación se desarrolla la tesis doctoral en cinco capítulos. Tras el desarrollo de la tesis en español, se presenta un resumen extendido en inglés, requisito necesario para la obtención del reconocimiento de doctorado europeo. Por último, al final del documento se recoge el listado de referencias bibliográficas utilizadas en la tesis y varios anexos con información detallada de algunos apartados.

El primer capítulo de la tesis es la introducción. En él se presenta el marco de la tesis compuesto por los antecedentes de la investigación y la estructura del presente documento. Le siguen los objetivos e hipótesis de la tesis, tanto generales como particulares. Finalizando la introducción con un resumen del drenaje sostenible, como parte de la construcción sostenible, y sus principales técnicas asociadas, entre las que se encuentran los firmes permeables. En el segundo capítulo se presenta el estudio del estado del arte referente a técnica constructiva de los firmes permeables. En esta revisión bibliográfica se analizan la definición de los firmes permeables, sus clasificaciones, sus ventajas e inconvenientes, así como las distintas capas y materiales de construcción que los componen. Además, se profundiza en la investigación realizada hasta la fecha para conocer y corregir los principales inconvenientes de los firmes permeables: la colmatación y la degradación. Se concluye este capítulo seleccionando las secciones de firmes permeables a estudiar en la parte experimental de la tesis.

El capítulo tercero se ocupa de las cuatro metodologías de ensayo empleadas en la fase de análisis experimental de los firmes permeables, tanto en laboratorio como en campo. Se incluyen las descripciones de los equipos desarrollados para esta investigación: el Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF) y el Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP); así como las metodologías de ensayo y la caracterización de los materiales empleados. Mientras, el capítulo cuarto se centra en los resultados obtenidos de los cinco estudios realizados con las metodologías planteadas, realizando el conveniente análisis y discusión de los mismos.

Por último, el capítulo quinto recoge las conclusiones, comenzando con una serie de recomendaciones para el proyecto y construcción de firmes permeables, fruto del estudio bibliográfico y de los análisis experimentales realizados. A continuación se presentan las conclusiones propiamente dichas, tanto particulares como generales. Por último, para finalizar la tesis, se enumeran las principales líneas de continuidad y trabajos futuros relacionados con la investigación sobre firmes permeables.

I.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

I.2.1 GENERALES

La presente tesis partió del proyecto de investigación: “Desarrollo de nuevas estructuras de firmes filtrantes biodegradantes de hidrocarburos (FIDICA)”. La principal finalidad de este proyecto era el diseño de estructuras de firmes filtrantes capaces de captar y tratar el agua procedente de la escorrentía superficial urbana. Las metas generales marcadas para este proyecto fueron las siguientes:

- Desarrollar nuevas estructuras de firmes permeables, analizando la posibilidad de emplear materiales reciclados para la construcción de los mismos y evaluando las diversas características físicas y mecánicas de los mismos.
- Analizar el comportamiento de las comunidades microbianas respecto a la degradación de hidrocarburos en el interior de los firmes permeables.
- Comprobar a escala real, mediante la construcción de áreas experimentales, el funcionamiento y evolución de las estructuras de firmes filtrantes diseñadas.
- Establecer la metodología de diseño más apropiada y los procedimientos constructivos más adecuados para los firmes filtrantes biodegradantes de hidrocarburos.

Dentro de este proyecto de investigación, esta tesis se ocupa del desarrollo de nuevas estructuras de firmes filtrantes biodegradantes de hidrocarburos mediante el 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. Por tanto, los objetivos generales de la presente tesis son:

- Estudiar la técnica constructiva de los firmes permeables y proponer nuevas secciones contemplando el uso de materiales reciclados.
- Analizar experimentalmente, en laboratorio y a escala real, el comportamiento de diferentes secciones de firmes permeables.
- Recoger las principales recomendaciones para el diseño y construcción de firmes permeables asegurando una adecuada calidad.

Por su parte, la principal hipótesis de esta tesis es suponer que los firmes permeables ofrecen la funcionalidad y la durabilidad suficientes para su correcta aplicación en vías urbanas con tráfico ligero, como aparcamientos de superficie para vehículos ligeros o calles de acceso a zonas residenciales.

1.2.2 PARTICULARES

La presente tesis pretende alcanzar los objetivos generales marcados de estudio, análisis y diseño de firmes permeables mediante la consecución de los siguientes objetivos particulares:

- Realizar un completo estudio del arte que permita identificar los principales problemas relacionados con los firmes permeables, sintetizando los estudios realizados para conocer y resolver dichos problemas.
- Seleccionar unas determinadas secciones de firmes permeables para su análisis experimental en base a las experiencias previas, contemplando el empleo de áridos reciclados.
- Desarrollar un ensayo de laboratorio que permita la caracterización de la resistencia a la colmatación de distintos tipos de pavimentos permeables, permitiendo así su comparación desde el punto de vista de funcionalidad.
- Desarrollar un ensayo de campo que permita el diagnóstico de los pavimentos permeables construidos, evaluando la capacidad de infiltración de los mismos, su estado de colmatación y su necesidad de mantenimiento.
- Desarrollar ensayos de laboratorio que permitan seleccionar los materiales de construcción más adecuados para la ejecución de firmes permeables con una correcta durabilidad.
- Construir modelos de secciones completas de firmes permeables para su comparación mediante la medición de parámetros básicos que permitan caracterizar la funcionalidad.
- Extraer de las experiencias realizadas los criterios de diseño y construcción más adecuados para asegurar la correcta funcionalidad y durabilidad de los firmes permeables.

Además, se realizan las siguientes hipótesis particulares como ayuda para dirigir el desarrollo de la tesis:

- El principal inconveniente de los firmes permeables sometidos a tráfico ligero es la pérdida de funcionalidad debida a la colmatación de la superficie a lo largo del tiempo.
- La durabilidad de un firme permeable está condicionada por la menor durabilidad de cualquiera de los materiales que lo componen.
- Distintos tipos de firmes permeables tienen distintas capacidades de infiltración, reacciones y respuestas ante los aportes de agua, siendo posible su caracterización, diagnóstico y la comparación.

I.3 DRENAJE SOSTENIBLE

I.3.1 DESARROLLO SOSTENIBLE Y CONSTRUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible, sustentable o perdurable nació en 1987 en el documento *Nuestro Futuro Común*, conocido como Informe Brundtland, fruto de los trabajos de la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas creada en 1983: “El desarrollo sostenible es un desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Mulder, 2007). Posteriormente, la aplicación de este concepto se asumiría en el tercer principio de la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo (1992): “El derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras”. Por tanto, el desarrollo sostenible supone adoptar soluciones de compromiso que aúnen avance económico con conservación medioambiental, pensando en el futuro a la hora de mejorar las condiciones actuales. Esto supone centrar las inversiones actuales en salud, calidad y medio ambiente con la intención de asegurar la obtención de beneficios a largo plazo (Castro *et al.*, 2005; Arenas Cabello, 2007).

El desarrollo sostenible supone un fuerte cambio de mentalidad, pues ya no son válidos los antiguos principios de industrialización y desarrollo económico basados en la falsa idea de que los recursos naturales son ilimitados. Hoy en día, se ha constatado que las reservas de petróleo se agotan, lo cual ha forzado una fuerte inversión en energías renovables y en medidas de ahorro energético (Corregidor Sanz y Fernández Guillén, 2004). Además, el aire está cada vez más contaminado, causando desajustes climáticos, y el agua dulce disponible no es capaz de satisfacer las demandas crecientes, haciendo necesaria la desalinización del mar. Toda acción tiene una reacción, y queda patente que el medio ambiente ha reaccionado ante la actividad humana con un agotamiento de recursos y un cambio en las condiciones ambientales que puede llegar a tener consecuencias dramáticas para la especie humana. Por todo ello, se deben tomar medidas apostando por el desarrollo sostenible en todos los campos de la actividad económica (Couchoud Gregori, 2004; Mulder, 2007). Así, la construcción sostenible es aquella en la que se cumplen los principios económicos, ecológicos y sociales del desarrollo sostenible, pudiendo dividirse en numerosas ramas según el tipo de obra a ejecutar. Por ejemplo, la edificación o arquitectura sostenible ofrece edificios que hacen frente a los problemas medioambientales actuales mediante un correcto diseño y construcción que permite disminuir fundamentalmente las demandas energéticas de iluminación y climatización (Arenas Cabello, 2007; Reyes *et al.*, 2007). Con los mismos principios, el drenaje sostenible aborda la gestión del agua de lluvia en las zonas urbanizadas.

1.3.2 AGUA DE LLUVIA EN LAS CIUDADES

El agua de lluvia tiene efectos fundamentalmente beneficiosos en las ciudades: purifica el aire, refresca el ambiente, limpia tejados y pavimentos, ayuda a mantener con vida a los árboles y a las superficies verdes, etc. Sin embargo, la carencia o el exceso de agua en las ciudades, como en el caso de cualquier otro recurso, causan problemas. Actualmente la gestión del agua de lluvia en las zonas urbanizadas se limita a su drenaje. Si bien la lluvia es fundamental para llenar los embalses y acuíferos a partir de los cuales se realizan los abastecimientos de agua potable a las ciudades, esa misma lluvia es tratada como un residuo indeseable dentro de esas mismas urbes. Así, toda el agua de lluvia que precipita en áreas urbanas es drenada rápidamente y vertida directamente al medio natural o al sistema de saneamiento, donde se mezcla con las aguas negras y pierde toda su calidad forzando su paso por las instalaciones de depuración.

Carente de valor, el agua de lluvia en las ciudades es aparentemente una fuente de problemas que pueden ser motivados por tres factores fundamentales:

- Cantidad de agua: las sequías e inundaciones motivan los principales gastos económicos bien sea en indemnizaciones o en construcción de infraestructuras: embalses, trasvases, colectores, tanques de tormenta, etc.
- Calidad del agua: la importancia creciente del medioambiente ha motivado la construcción de sistemas de depuración y control para evitar los daños ambientales a los medios receptores que no siempre son capaces de resolver los problemas debidos a la contaminación difusa originada por las aguas pluviales.
- Servicio del sistema: la sociedad actual demanda cada día mayor calidad en el entorno urbano exigiendo al sistema de drenaje estética, funcionalidad, comodidad, aprovechamiento de los recursos disponibles, etc.

Esta tesis se centra en los problemas asociados a la gestión de la cantidad de aguas pluviales y al servicio ofrecido por los sistemas de drenaje empleados, dejando aparte los problemas de calidad de las aguas.

1.3.2.1 Cantidad

En los últimos años, debido al rápido desarrollo urbano, los sistemas de drenaje urbano que forman parte del sistema de saneamiento de cualquier ciudad se han visto desbordados en tiempo de lluvias debido a la gran cantidad de agua pluvial que reciben. Los volúmenes de aguas pluviales procedentes de zonas urbanas impermeables se suman una y otra vez hasta que llegan a sobrepasar la capacidad de los colectores, tanques de tormenta y depuradoras

existentes. Así, los problemas económicos más importantes causados por el agua de lluvia en las ciudades están asociados a su cantidad y a los daños que producen inundaciones, riadas, desbordamientos etc.

En el ciclo natural del agua, parte de la precipitación es interceptada por las plantas antes de tocar el suelo, el resto, una vez en el terreno, se infiltra y aumenta la humedad del mismo hasta alcanzar el máximo, produciéndose a partir de entonces acumulaciones superficiales y flujos de escorrentía superficial y subsuperficial (Mikkelson, 1997; Jiménez, 1999). El agua acumulada superficialmente puede formar lagos naturales o artificiales, o bien infiltrarse recargando los acuíferos. Mientras, la escorrentía superficial de una cuenca tiene un tiempo de concentración que depende de la topografía, el tipo de suelo y la vegetación (Dirección General de Carreteras, 1990). Una vez concentrada en cauces, el agua corre hacia el mar oxigenándose en el trayecto, siendo parte de ella infiltrada o almacenada en superficie. De este modo, lagos, acuíferos, ríos y embalses se convierten en las principales fuentes de agua dulce para el uso humano. Destaca en el ciclo natural la presencia constante del proceso de evapotranspiración de la vegetación, que junto con la evaporación por acción del sol, cierra el ciclo en cualquier punto devolviendo el agua a la atmósfera en forma de vapor (Revilla Cortezón *et al.*, 1982; ASCE y WEF, 1992; Jiménez, 1999; Butler y Davies, 2000).

Por el contrario, el ciclo del agua en las ciudades es completamente distinto. En la ciudad no hay apenas cobertura vegetal para interceptar la lluvia, sino tejados y suelos impermeables con un umbral de escorrentía muy bajo. Por lo tanto, la precipitación se transforma en su mayor parte en escorrentía superficial que se concentra rápidamente originando grandes caudales punta. Esta gran cantidad de agua es drenada a través de sumideros y alcantarillas pasando al sistema de saneamiento y evitando las acumulaciones de grandes volúmenes en los puntos más bajos de la ciudad. En comparación con las zonas naturales no urbanizadas, en las ciudades apenas se produce escorrentía subsuperficial, infiltración, almacenamiento superficial o subterráneo, evapotranspiración o evaporación. Por tanto, en una cuenca urbana el hidrograma de escorrentía de una lluvia dada es totalmente distinto al que se produce en una cuenca natural de similar área. La principal diferencia es la importante punta de caudal que se genera en muy poco tiempo debido al mayor porcentaje de superficie impermeable. La gestión de estas puntas para evitar los daños que puedan causar motiva la construcción de sistemas de drenaje de gran tamaño en las ciudades (Temprano *et al.*, 1996; Jiménez, 1999).

Entre los procesos hidrológicos naturales ausentes en las ciudades, destacan los tres que se definen a continuación (Revilla Cortezón *et al.*, 1982; Nanía y Gómez Valentín, 2004; Martínez Marín, 2005; RAE, 2008):

- Infiltración: proceso por el cual se introduce un líquido en el interior de los huecos

de un medio sólido, siendo la capacidad de infiltración la máxima velocidad con la que el agua penetra a través de la superficie del medio sólido.

- Permeabilidad: capacidad de un medio para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna, siendo una capa de material permeable aquella que deja pasar a través de todo su espesor una cantidad apreciable de agua, e impermeable si la cantidad es nula o despreciable.
- Filtración: proceso por el cual una mezcla de sólidos, líquidos y gases, como puede ser la escorrentía superficial urbana, atraviesa un medio poroso de manera que parte de la mezcla queda atrapada en él.

Para paliar estas carencias del ciclo del agua en las ciudades y los problemas asociados, las mejoras en los sistemas de drenaje urbano convencional son continuas: construcción de mayores tanques de tormenta, automatización de las conexiones, control en tiempo real, etc. No obstante, la mayoría de las zonas de nuevo desarrollo de las ciudades siguen siendo impermeables y su red de drenaje se conecta al colector más cercano, sumando volúmenes de agua una y otra vez hasta llegar a sobrepasar las capacidades de colectores generales, tanques de tormenta y depuradoras existentes (Aguado, 1995; Gómez *et al.*, 2004). Así, a pesar de las importantes inversiones para mejorar los sistemas de drenaje urbano, los problemas relacionados con la cantidad de escorrentía superficial siguen produciendo importantes pérdidas económicas e incluso pérdidas humanas (Marsalek y Chocat, 2002). Alcanzado un determinado tamaño de cuenca, la concentración rápida del agua de lluvia en un punto requiere la construcción de colectores de dimensiones tan grandes como túneles de metro, lo cual supone sistemas totalmente sobredimensionados desde el punto de vista de saneamiento de las aguas negras. Además, las lluvias torrenciales muestran sin piedad los caminos de drenaje y las zonas de inundación naturales, sin importar si se han construido campings o edificios en ellas. Todo ello hace que cada año surgan nuevas noticias en los medios de comunicación asociadas a inundaciones, deslizamientos, desbordamientos, riadas, etc.; todos ellos problemas debidos a una excesiva cantidad de agua de lluvia sin una adecuada gestión en zonas urbanizadas.

1.3.2.2 Servicio

El agua de lluvia en las ciudades produce una serie de problemas de servicio de carácter social como son: carencias funcionales y estéticas de los sistemas de drenaje, falta de comodidad y de seguridad en tiempos de lluvia, pérdida de valor del agua o concentración del calor en el centro urbano. En la Figura I-1 se muestra un ejemplo de una zona impermeable con un deficiente diseño de drenaje que motiva la acumulación superficial del agua de lluvia, limitando el uso del área afectada y afectando a la estética del conjunto.



Figura I-1. Superficie impermeable con un deficiente diseño de drenaje.

Además, en cualquier parte de la ciudad las acumulaciones superficiales de agua en aceras y calles causan problemas de comodidad y seguridad para el tráfico, tanto de peatones como de vehículos: resbalones, disminución del coeficiente de resistencia al deslizamiento, salpicaduras, pérdidas de visibilidad, etc. Pero el mayor problema de servicio asociado al agua de lluvia en las ciudades es la rápida pérdida de valor que sufre sin haber sido utilizada. El agua entra en las ciudades a través del sistema de abastecimiento o de la lluvia y tras ser usada o drenada se concentra en el sistema de saneamiento. El abastecimiento de agua potable no es sencillo pues las dotaciones demandadas son cada vez mayores y los ríos y acuíferos están sobreexplotados, en muchos casos cerca de agotarse. Esto hace que los efectos de las sequías sean cada vez peores motivando cortes en el suministro de agua que afectan no sólo al consumidor sino además al sector industrial, agrario y turístico del país produciendo pérdidas millonarias para la economía (Niemczynowicz, 1999; Gómez *et al.*, 2004). Mientras, el agua de lluvia en las ciudades, a pesar de ofrecer una calidad adecuada para multitud de usos, se utiliza únicamente como medio de dilución de aguas residuales, incrementando el volumen de agua a depurar y por tanto las dimensiones de las instalaciones.

Por último, otro problema más asociado al rápido drenaje del agua de lluvia fuera de las ciudades es la pérdida de la capacidad natural del terreno de suavizar la temperatura ambiente. Este efecto de concentración del calor en los centros urbanos, conocido con el nombre de “isla de calor”, es debido a la continua impermeabilización de las ciudades y afecta directamente a la comodidad de sus habitantes. El aislamiento del terreno mediante pavimentos cerrados que evitan el paso del agua y del aire hace que sea prácticamente imposible la regulación natural de la temperatura y humedad de la superficie de las zonas urbanizadas, por lo que en las ciudades se crea un microclima que dificulta su habitabilidad (Yang y Jiang, 2003).

1.3.3 SOLUCIONES SOSTENIBLES DE DRENAJE

El drenaje urbano sostenible, o simplemente drenaje sostenible, ayuda a solucionar los problemas asociados al agua de lluvia en las ciudades, pudiendo aplicarse también en carreteras, puertos, aeropuertos, y cualquier otra zona urbanizada que requiera de un sistema de drenaje de aguas pluviales.

La necesidad de aplicar los principios del desarrollo sostenible al diseño del drenaje urbano se debe al crecimiento de la población y por tanto, de las zonas urbanas en los últimos años (Marsalek and Chocat, 2002). Dicho crecimiento no es sostenible y sobrepasa cualquier previsión, cualquier diseño, cualquier planeamiento de servicios urbanos, produciendo un gran aumento de las superficies impermeables y de los problemas asociados a la escorrentía superficial generada. Por tanto, los sistemas de drenaje urbano actuales necesitan de la aplicación de técnicas nuevas que ayuden a solucionar los problemas existentes. En este sentido, el drenaje sostenible pretende tratar de forma natural el agua de lluvia y aprovecharla en lo posible, sin convertirla en agua residual, con el objetivo de completar la labor realizada por los sistemas de drenaje convencionales (Lasa *et al.*, 2004).

El desarrollo sostenible aplicado al drenaje urbano toma forma en un conjunto de medidas e instalaciones que pretenden minimizar los problemas asociados al ciclo del agua en la ciudad. Así, frente a los problemas causados por la cantidad, la calidad y el servicio, la gestión sostenible de las aguas pluviales se fundamenta en la laminación de la cantidad de agua, la mejora de su calidad mediante procesos naturales, y el servicio al ciudadano a través de la mejora del paisaje urbano y la recuperación de hábitats naturales dentro de las ciudades (Fernández *et al.*, 2003; Lasa *et al.*, 2004).

1.3.3.1 Corrientes de pensamiento

Dentro del movimiento global del desarrollo sostenible se engloban una serie de soluciones novedosas para completar y mejorar el drenaje urbano actual que ahorren problemas a los sistemas de saneamiento existentes (Schueler, 1987; Field *et al.*, 2006a; Novotny, 2007). Estas soluciones están englobadas en distintas corrientes de pensamiento como el Desarrollo de Bajo Impacto, traducción de Low Impact Development (LID); o el Diseño Urbano Sensible al Agua, traducción de Water Sensitive Urban Design (WSUD); recibiendo diversos nombres como:

- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), traducción de Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).
- Buenas Prácticas Ambientales (BPAs) referidas al agua de lluvia, traducción del

Stormwater Best Management Practices (BMPs).

- Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS).
- Mejores Prácticas de Control (MPC) de la escorrentía superficial.
- Técnicas alternativas de drenaje.

La corriente más amplia y general es el Desarrollo Urbano Sostenible o Desarrollo de Bajo Impacto, dado que engloba un conjunto de técnicas específicas referidas al drenaje urbano y además, un conjunto de prácticas de planeamiento urbanístico más amplias que consideran desde un primer momento la problemática asociada al drenaje urbano (EPA, 2000; Field *et al.*, 2006b). El mismo carácter general queda recogido en la corriente de Diseño Urbano Sensible al Agua, originada en Australia (Dunphy *et al.*, 2005). Esta tendencia permite a arquitectos y urbanistas aprovechar las posibilidades que ofrece la presencia de agua en las ciudades para ofrecer unos sistemas de gestión de la escorrentía con unos acabados y una calidad estética que enriquezcan el entorno urbano (Dreiseitl *et al.*, 2001).

Más específicas son las Buenas Prácticas Ambientales (BPAs), originarias de Estados Unidos. Las BPAs cubren todo tipo de técnicas de construcción respetuosas con el medioambiente, incluidas las específicas del drenaje de aguas pluviales. La difusión de estas técnicas es muy amplia. Así, en Estados Unidos son diversos los estados que han editado sus propios manuales de diseño y construcción, siendo uno de los más completos el ofrecido por el Estado de California (Caltrans, 2007). Además, en este país, la EPA (Environmental Protection Agency) tiene diversos programas nacionales relacionados con el drenaje sostenible y la utilización de Stormwater BMPs (EPA, 2002). Mientras, en España, el Gobierno Regional de Cantabria a comenzado a fomentar la aplicación de algunas de estas técnicas en las carreteras de especial protección de la región (Valle *et al.*, 2006).

En el Reino Unido, el desarrollo de los SUDS ha tenido lugar durante los últimos años, basándose en los objetivos marcados por la Agenda 21 respecto a gestión del agua en las ciudades. Esta corriente específica la forman multitud de experiencias reales, empresas especializadas, congresos y grupos de trabajo de profesionales especializados en drenaje sostenible (National SUDS Working Group, 2003 y 2004). Tampoco faltan guías y manuales como los editados por la Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). Esta asociación lleva desarrollando desde hace más de diez años distintos programas relacionados con los SUDS, muchos de los cuales continúan en la actualidad (CIRIA, 2008).

En el resto de Europa son muchos los países que se han sumado a estas corrientes. Destacan Francia, donde el uso de técnicas alternativas de drenaje para la gestión de la escorrentía superficial se aplica desde hace años con éxito (Chaïb, 2003); Alemania, donde existen regulaciones que potencian el aumento del porcentaje de superficie permeable (Fach *et*

al., 2002); y Dinamarca, donde se incentiva la construcción de aparcamientos verdes por su valor paisajístico (Kluck *et al.*, 2005). Además, Francia, Alemania y Dinamarca, junto a la República Checa, Grecia, Holanda, Suecia y el Reino Unido, participan en el proyecto “DayWater” del 5º Programa Marco Europeo. Este proyecto está desarrollando un ADSS (Adaptive Decision Support System) que pretende facilitar el proceso de análisis y toma de decisión sobre los diseños de sistemas de drenaje sostenible, para la correcta utilización, entre otras técnicas, de los pavimentos permeables (Middlesex University, 2003). Además, otros países del mundo como Chile han recogido y publicado completas recomendaciones para la gestión de las aguas de lluvia (MINVU, 1996).

Mientras, en España, a nivel nacional, el Plan Hidrológico Nacional se ha modificado una y otra vez, planteando diversas soluciones para satisfacer las crecientes demandas actuales, como por ejemplo la desalación, anteriormente desestimada por su alto coste (Jefatura del Estado, 2004). También se ha procurado fomentar la gestión adecuada del agua dentro del programa de Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua (A.G.U.A.) que esta desarrollándose actualmente (Ministerio de Medio Ambiente, 2007). Sin embargo, los sistemas de drenaje sostenible no han encontrado su lugar en ninguna de las iniciativas nacionales, debiendo aplicarse a nivel local. Así, en Barcelona desde hace años se conocen las TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible) y, aún sin estar agrupados propiamente como BMPs o SUDS, existen numerosos ejemplos de aplicación de técnicas de drenaje sostenible en diversas localidades: un parque urbano para la laminación de avenidas en Barcelona (Cabrera Cazorla y Raso Quintana, 2006), un parque fluvial para la ciudad de Zaragoza (Aragües Rioja *et al.*, 2006), balsas de laminación de avenidas en nuevas actuaciones urbanísticas en Valencia (Preciado Romero y Parrilla Juste, 2006) o el aparcamiento permeable de la Guía en Gijón (Rodríguez *et al.*, 2006).

Por otra parte, en el sector comercial, existen numerosas empresas en Alemania, Australia, Estados Unidos, Francia o el Reino Unido que ofertan distintos productos relacionados con el drenaje sostenible, desde adoquines patentados con distintos acabados, hasta cultivos de bacterias biodegradantes de hidrocarburos, pasando por estructuras de plástico para la depuración y almacenamiento del agua de lluvia. El crecimiento en número y volumen del comercio de estas empresas indica la creciente demanda de la sociedad. Destacar, en el campo de los pavimentos permeables, la empresa australiana Atlantis, especialista en superficies de césped reforzado con celdas de plástico (Atlantis, 2008) y la empresa Hanson-Formpave del Reino Unido, pionera en el empleo de pavimentos permeables con adoquines (Hanson-Formpave., 2008).

1.3.3.2 Ventajas del drenaje sostenible

Las alternativas a la hora de plantear el drenaje urbano de una zona de nueva construcción son dos (Temprano *et al.*, 1996):

- Sistema unitario de alcantarillado: las aguas residuales de las viviendas comparten conducciones con las aguas pluviales procedentes de la escorrentía superficial.
- Sistema separativo: las aguas residuales y las aguas grises tienen dos redes de conducciones diferenciadas. Implica un mayor coste económico y algunas ventajas como la reducción de la contaminación debida a los reboses en tiempo de lluvia o el ahorro en gastos de explotación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

El drenaje sostenible puede ser considerado como un sistema de drenaje de aguas grises de bajo coste, heredando por tanto las ventajas del mismo. Además, los sistemas de drenaje sostenible son aplicables puntualmente a cualquiera de los dos tipos de redes de drenaje, mejorando su funcionamiento y eficacia.

Las ventajas que ofrece el drenaje sostenible son principalmente tres: control de la cantidad de agua de lluvia, mejora de su calidad y servicio a la sociedad. Estas tres ventajas generales se pueden expresar en múltiples y variadas ventajas particulares como la prevención de inundaciones, la recarga de los acuíferos o el desarrollo urbano de calidad en zonas donde el sistema de alcantarillado existente está a punto de saturarse (EPA, 1999a; Novotny, 2007). Además, las técnicas alternativas de drenaje depuran naturalmente la escorrentía superficial y enriquecen el paisaje urbano hasta el punto de incrementar el valor de las propiedades cercanas. Por tanto, estos sistemas no sirven sólo para solucionar los problemas asociados a la cantidad y a la calidad de la escorrentía superficial, sino que además ofrecen un servicio añadido a la sociedad, creando entornos naturales y mejorando la calidad estética de una zona urbana (ASCE, 1994; CIRIA, 2001).

La principal ventaja desde el punto de vista de control de la cantidad de agua es la prevención de inundaciones. La laminación mediante el uso de SUDS queda plasmada en un aumento del tiempo de respuesta (lag time). El tiempo de respuesta se define como el tiempo que transcurre entre el centro de gravedad de la lluvia neta y el caudal pico del hidrograma (Revilla Cortezón *et al.*, 1982; Chadwick y Morfett, 1993). Al prevenir las inundaciones y permitir la recogida de agua de lluvia, los SUDS son una herramienta fundamental para hacer frente a los efectos del cambio climático (Woking Borough Council, 2005).

El CIRIA (2001) enumera las siguientes ventajas particulares del drenaje sostenible:

- Protege y mejora la calidad del agua y la biodiversidad en corrientes urbanas.
- Mantiene o restaura el flujo normal en corrientes urbanas.
- Protege las propiedades y las personas de las inundaciones, ahora y en el futuro.

- Protege las corrientes urbanas de vertidos accidentales y pérdidas de tuberías.
- Permite el desarrollo urbano en áreas cuyo alcantarillado está colapsado.
- Ofrece valores estéticos que ayudan a enriquecer visual y medioambientalmente una zona determinada.
- Permite la recarga de los acuíferos donde se considere adecuado.
- Embellece la construcción urbana.

Por último, en el prontuario de protección del medio ambiente estatal, autonómico y municipal, García Gil (2007) indica que: “Desde el punto de vista de las técnicas de depuración, la norma debe exigir la utilización de aquella que mejor se adapte a las condiciones naturales de la zona donde se ubica y a la cantidad y calidad de los vertidos, procurando la utilización de las menos costosas y que mejor aprovechen las condiciones de autodepuración naturales y que, a su vez, produzcan menos residuos.” Teniendo en cuenta las ventajas que ofrece, el drenaje sostenible encaja a la perfección en esta observación legal, asegurando la mejor gestión posible de las aguas pluviales.

1.3.3.3 Inconvenientes del drenaje sostenible

El drenaje urbano sostenible promete una serie de beneficios que deben ser probados con la práctica, solventando sus principales inconvenientes que son:

- El desconocimiento por parte de los diseñadores que limita su aplicación de partida.
- La desconfianza que genera frente al drenaje convencional.
- La inexperiencia en el sector de la construcción en su adecuada ejecución.
- La necesidad de un mantenimiento específico.
- La existencia de malas experiencias debidas a los puntos anteriores.

Estos inconvenientes deben ser tratados como retos para la investigación y la innovación. Por tanto, las necesidades de investigación referentes al drenaje sostenible son (Rivard *et al.*, 2005):

- Monitorización y análisis a largo plazo de los sistemas construidos.
- Modelos globales que integren las modificaciones a lo largo del tiempo.
- Indicadores de rendimiento adecuados.
- Estudios de costes totales a lo largo de la vida útil.
- Definición de soluciones específicas y de sistemas de toma de decisión adecuados.
- Análisis en distintas condiciones climáticas.
- Guías de diseño globales que sirvan para cuencas completas.

Son diversos los programas de investigación y los manuales cuyo único objetivo es ampliar el conocimiento acerca del drenaje sostenible y sus diferentes técnicas, dando soluciones a los problemas que puedan plantear mediante la evaluación de las aplicaciones reales realizadas.

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers, ASCE), en la publicación editada por Field *et al.* (2006a) recoge algunos de los programas de monitorización y seguimiento desarrollados en Estados Unidos, así como múltiples experiencias y resultados de todo tipo de SUDS en distintos lugares del país. La ASCE lleva años desarrollando diversos programas de investigación y desarrollo de técnicas para el control de la contaminación difusa producida por la escorrentía superficial, dando lugar a múltiples comunicaciones, informes y manuales entre los que destacan el ASCE y WEF (1992). Además, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA) tiene su propio manual sobre el tipo de ensayos y análisis necesarios para evaluar la eficiencia de las distintas buenas prácticas de gestión de agua de lluvia. En esta publicación se indican los parámetros a medir en cada caso, de modo que los resultados se puedan incorporar directamente a la Base de Datos Nacional de la EPA, creada para controlar la aplicación y eficacia de estos sistemas (EPA, 2002). En esta línea son destacables también las publicaciones de la EPA (1999a, 1999b), específicas sobre BMPs y firmes permeables, y la publicación conjunta de la ASCE y EPA (2002), dedicada a la monitorización de BMPs, incluidas las zonas experimentales de firmes permeables.

También en Estados Unidos, se puede encontrar diversos manuales prácticos, siendo uno de los más completos y actuales el publicado por City of Lincoln, Nebraska and the Lower Platte South Natural Resources District (2006). Este manual es fruto de una amplia experiencia y ofrece información detallada sobre el diseño y construcción de cada tipo de BMP o SUDS.

Por su parte, France (2002), en su manual de planeamiento y diseño sensible al agua, presenta treinta y cuatro estudios relacionados con la investigación y aplicación de SUDS, fundamentalmente en Estados Unidos, Canada y Australia, pero también en otros países como Tailandia o Israel. En la misma línea, Marsalek y Chocat (2002) presentan, en su informe sobre la gestión del agua de lluvia, datos recogidos en dieciocho países por la Asociación Internacional del Agua (International Water Association, IWA). Estos resultados indican una creciente aceptación y aplicación de los SUDS en todo el mundo. Además, queda patente en este informe una clara tendencia hacia la utilización de técnicas de control en origen de la escorrentía superficial mediante métodos más sostenibles con un enfoque global. Se concluye que es necesario y fundamental compartir la información sobre las aplicaciones reales y las investigaciones relacionadas con SUDS en todo el mundo para asegurar los máximos

rendimientos y beneficios ofrecidos por estos sistemas.

En el Reino Unido, desde 1997 y en colaboración con la agencia de medio ambiente escocesa, se está desarrollando un programa para la instrumentación y análisis del funcionamiento de SUDS. Dentro de estos sistemas de drenaje sostenibles se encuentran catalogados los firmes permeables, con los que se han obtenido resultados muy positivos. Esta constante investigación a lo largo de los años ha dado lugar a los manuales de diseño C521 y C522 (CIRIA, 2000a y 2000b), englobándose ambos en la publicación C523 (CIRIA, 2001). Posteriormente se publicó el manual dedicado al control en origen mediante la utilización de firmes permeables, el C582, realizado por Pratt *et al.* (2002), y el más completo y actual respecto a SUDS, el C609 de Wilson *et al.* (2004).

Además, el profesor Pratt de la Universidad de Coventry presenta una completa revisión bibliográfica de multitud de aplicaciones y programas de monitorización y seguimiento de todo tipo de SUDS en Estados Unidos, Francia, Reino Unido, Dinamarca, Suiza, Japón y Suecia, entre otros países, demostrando en todos los casos las mejoras obtenidas a través de la investigación e innovación en el campo del drenaje sostenible desde 1975 (Pratt, 2004).

En resumen, programas de investigación como el titulado: “Evaluación de BMPs para el control de la escorrentía en autovías”, demuestran como el conocimiento pormenorizado de los SUDS permite su adaptación a cualquier circunstancia mediante un diseño adecuado (Quigley *et al.*, 2005)

En cualquier caso, es la sociedad la que decide en última instancia. Así, la percepción social de los SUDS y la aceptación de los diseñadores han sido evaluadas mediante una encuesta nacional en Francia. El análisis de los resultados muestra que la prevención de inundaciones es la motivación fundamental para el empleo de SUDS, pero siempre como complemento del empleo de técnicas convencionales de drenaje urbano. Los SUDS con valor paisajístico, como los estanques de retención, son mejor considerados que las técnicas menos visibles como los aparcamientos de firmes permeables (Martin *et al.*, 2005).

I.4 TÉCNICAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

I.4.1 CLASIFICACIONES

Son numerosos los criterios de clasificación que se pueden emplear a la hora de catalogar las distintas técnicas de drenaje urbano sostenible, pudiendo recibir algunas de ellas diversos nombres. Cada manual, cada entidad, cada grupo de investigación utiliza prácticamente su propia clasificación. A continuación se presentan algunas de estas clasificaciones a partir de las cuales se ha elaborado una propuesta, tratando de primar la sencillez y la claridad de conceptos.

Temprano *et al.* (1996) se refieren a los SUDS como medidas de control de la contaminación, clasificándolas según dos criterios.

- Según el grado de intervención en la estructura de la red:
 - Medidas no estructurales: medidas complementarias que no precisan actuación alguna sobre la red como la construcción de pavimentos permeables o la higiene urbana.
 - Medidas estructurales: aquellas que implican mejoras de la red de drenaje, como por ejemplo la modificación de los volúmenes de almacenamiento o el tratamiento de los reboses.
- Según el lugar del sistema de alcantarillado donde se apliquen:
 - Control en origen: medidas de control que se aplican previamente al sistema de drenaje.
 - Control de los vertidos: medidas que se aplican a elementos de la red de alcantarillado.

Jiménez (1999) traduce BMPs (Best Management Practices) por MPC (Mejores Prácticas de Control) y clasifica las prácticas y mecanismos de control de la contaminación de la escorrentía superficial urbana de la siguiente forma:

- Mecanismos de infiltración:
 - Depósitos y estanques de infiltración.
 - Lechos, zanjas y pozos de infiltración.
 - Tuberías perforadas de infiltración.
 - Pavimentos porosos.
- Mecanismos de filtración:
 - Depósitos filtrantes.
 - Filtros de arena y/o turba.
- Mecanismos de control por medio de vegetación:

- Canal de drenaje de estabilización con cubierta vegetal.
- Franja filtrante.
- Mecanismos de detención y retardo:
 - Pequeños sumideros y controles especiales.
 - Estanque seco de detención extendida.
 - Estanque húmedo (depósito de retención).
 - Humedales artificiales.
 - Almacenamiento en el sistema de drenaje (en línea y/o fuera de línea).

En el Reino Unido los principales organismos relacionados con el medio ambiente apoyan el uso de SUDS facilitando amplia variedad de información. Así, en la introducción a los SUDS de la Environmental Alliance (2001) se realiza la siguiente clasificación:

- Técnicas de control en origen (source control techniques):
 - Pavimentos porosos (porous pavements).
 - Zanjas de infiltración (infiltration trenches).
 - Depósitos de infiltración (infiltration basins).
- Sistemas de conducción permeable (permeable conveyance systems):
 - Drenes filtrantes o franceses (filter or French drains).
 - Cunetas de hierba o cunetas verdes (swales).
- Sistemas de tratamiento pasivo (passive treatment systems):
 - Franjas filtrantes (filter strips).
 - Depósitos de detención (detention basins).
 - Estanques de retención (retention ponds).
 - Humedales (wetlands).

En la publicación C523 del CIRIA (2001), se realiza una clasificación más simplificada de los SUDS:

- Superficies permeables y drenes filtrantes (permeable surfaces and filter drains).
- Franjas filtrantes y cunetas verdes (filter strips and swales).
- Mecanismos de infiltración (infiltration devices).
- Depósitos y estanques (basins and ponds).

Posteriormente, las técnicas individuales consideradas por Wilson *et al.* (2004) para la publicación del CIRIA C609 son:

- Medidas preventivas (preventative measures).
- Pavimentos permeables (pervious pavements).
- Tejados verdes (green roofs).
- Bioretención (bioretention).

- Técnicas de filtrado (filtration techniques).
- Franjas filtrantes con césped (grassed filter strips).
- Cunetas de hierba o cunetas verdes (swales).
- Mecanismos de infiltración (infiltration devices).
- Depósitos de infiltración (infiltration basin).
- Drenes filtrantes (filter drains).
- Estanques y depósitos de detención (ponds and detention basins).
- Humedales artificiales (constructed stormwater wetlands).
- Almacenamiento en línea o fuera de línea (on-/off-line storage).
- Separadores de aceite (oil separators).
- Sistemas de tratamiento innovadores (innovative treatment systems).

En Estados Unidos, la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA, 1999a) toma la siguiente clasificación usada por National Stormwater BMP Database (Base de datos nacional de buenas prácticas ambientales) de la ASCE:

- Buenas Prácticas Ambientales estructurales (structural BMPs):
 - Sistemas de infiltración (infiltration systems):
 - Depósitos de infiltración (infiltration basins).
 - Sistemas de firmes permeables (porous pavement systems).
 - Zanjas y pozos de infiltración (infiltration trenches and wells)
 - Sistemas de detención (detention systems)
 - Depósitos de detención (detention basins).
 - Bóvedas, tuberías y tanques subterráneos (underground vaults, pipes and tanks).
 - Sistemas de retención (retention systems):
 - Estanques de retención (retention ponds).
 - Tanques, túneles, bóvedas y tuberías de retención (retention tanks, tunnels, vaults and pipes).
 - Humedales artificiales (constructed wetland systems)
 - Humedales con depósitos y canales (wetland basins and wetland channels).
 - Sistemas de filtrado (filtration systems):
 - Filtro superficial de arena (surface sand filter).
 - Filtro subterráneo de arena (underground vault sand filter).
 - Sistemas biofiltro/bioretencción (biofiltration/bioretention Systems).
 - Sistemas vegetados, biofiltros (vegetated systems, biofilters):
 - Franjas filtrantes de césped (grass filter strips).

- Cunetas verdes vegetadas (vegetated swales).
- Minimizar las superficies impermeables directamente conectadas (minimizing directly-connected impervious surfaces).
- Combinaciones y sistemas proporcionados por los vendedores (miscellaneous and vendor-supplied systems).
- Buenas prácticas ambientales no estructurales (non-structural BMPs):
 - Educación, reciclado y controles en origen (education, recycling and source controls)
 - Eliminación de productos de la automoción (automotive product disposal).
 - Buena gestión de los espacios comerciales y de mercado (commercial and retail space good housekeeping).
 - Implicación de la comunidad en general (general community outreach).
 - Buena gestión industrial (industrial good housekeeping).
 - Control de los sumideros (storm drain inlet stenciling).
 - Uso de pesticidas/herbicidas (pesticide/herbicide use).
 - Uso de fertilizantes (fertilizer use).
 - Eliminación de productos químicos y tóxicos del hogar (household hazardous material disposal).
 - Lawn debris management (gestión de los residuos de las siegas).
 - Eliminación de residuos de mascotas (pet waste disposal).
 - Detección y eliminación de vertidos ilícitos (illicit discharge detection and elimination).
 - Prácticas de mantenimiento (maintenance practices):
 - Limpieza de arquetas y depósitos de captación (catch basin clearing).
 - Barrido de calles y aparcamientos (street and parking lot sweeping).
 - Mantenimiento de carreteras y canales (road and ditch maintenance).
 - Empleo de sal y arena en carreteras (road salting and sanding).
 - Recogida de sedimentos y flotables de sistemas de drenaje sostenible (sediment and floatables removal from BMPs)
 - Mantenimiento de la vegetación (vegetation maintenance).
 - Mantenimiento general de los sistemas de drenaje sostenible (general BMP maintenance).
- Prácticas de Desarrollo de Bajo Impacto (Low-Impact Development Practices)

- Minimizar áreas impermeables (minimizing impervious areas).
- Crecimiento dirigido (directed growth).
- Protección de áreas sensibles (sensitive area protection).
- Preservación de los espacios abiertos (open space preservation).
- Minimizar las afecciones al suelo y a la vegetación (minimizing soil and vegetation disturbance).

Una de las últimas y más completas descripciones de las BMPs para la gestión de aguas pluviales corresponde al Departamento de Transportes de California (Caltrans, 2007). El informe final de la división de análisis medioambiental realiza un completo repaso de ciento veinticuatro técnicas, algunas de ellas de marcas registradas, que han sido evaluadas en aplicaciones reales en el estado de California. Cada hoja técnica cuenta con los siguientes apartados: descripción, esquema, rendimiento de depuración de los distintos contaminantes, claves de diseño, análisis de costes, consideraciones de mantenimiento, ventajas, inconvenientes y referencias. La clasificación de las técnicas se realiza en base a once categorías básicas:

- Bioretención (dos técnicas).
- Detención/sedimentación (doce técnicas).
- Desinfección (cuatro técnicas).
- Complementos de sumideros (treinta y nueve técnicas).
- Filtrado (dieciocho técnicas).
- Separadores hidrodinámicos (catorce técnicas).
- Infiltración (once técnicas).
- Trampas de basura y sedimentos (seis técnicas).
- Superficies porosas (cuatro técnicas).
- Decantadores y separadores de aceite (once técnicas).
- Humedales artificiales (tres técnicas).

Tras haber analizado las principales clasificaciones existentes, y como síntesis de las mismas, en la Tabla I-1 se presenta la clasificación propuesta para las técnicas de drenaje sostenible. En esta clasificación se engloban doce técnicas agrupadas en cuatro categorías. La primera categoría corresponde a las medidas preventivas que deben ser consideradas en cualquier diseño o aplicación del drenaje urbano. Las tres categorías restantes recogen las soluciones puramente constructivas, consideradas propiamente como sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

Tabla I-1. Clasificación propuesta de técnicas de drenaje sostenible.

Categoría dentro del drenaje sostenible		Técnica de drenaje sostenible
A. Medidas preventivas		1. Legislación
		2. Formación
		3. Inversión
Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)	B. Sistemas de infiltración	4. Superficies permeables
		5. Pozos de infiltración y zanjas de infiltración
		6. Depósitos de infiltración
	C. Sistemas de captación y transporte	7. Drenes filtrantes o drenes franceses
		8. Cunetas verdes
		9. Franjas filtrantes
	D. Sistemas de tratamiento pasivo	10. Depósitos de detención
		11. Estanques de retención
		12. Humedales artificiales

En los siguientes apartados se describen brevemente cada una de las cuatro categorías y cada una de las doce técnicas de la clasificación propuesta, finalizando con un breve resumen de la combinación de todas ellas para constituir la cadena de drenaje sostenible.

I.4.2 MEDIDAS PREVENTIVAS

Se definen como cualquier actuación de base que evite que se produzcan los problemas asociados a la escorrentía superficial. Las medidas preventivas son consideradas no estructurales (EPA, 1999a; Temprano *et al.*, 1996) pues no requieren obra alguna. Según Campbell *et al.* (2004) las medidas preventivas pueden clasificarse en tres categorías: legislación, educación y programación económica. Por otra parte, Temprano *et al.* (1996) consideran que para el control de la basura en las calles son fundamentales tres puntos: una legislación adecuada, la creación de programas de educación pública y un buen servicio de recogida. Por tanto, las medidas preventivas pueden resumirse en: legislación, formación e inversión.

I.4.2.1 Legislación

El respeto a la ley, basado en la información y el cumplimiento de las sanciones, es fundamental. Desde el punto de vista legal, existen cinco formas de intervención municipal en el medio ambiente urbano (García Gil, 2007) que pueden fomentar el empleo de los SUDS:

- Regulación: ordenanzas sobre medio ambiente.
- Control preventivo: licencias y otros instrumentos de control.
- Sanciones: multas y penalizaciones.
- Información: acceso libre a la información de las administraciones públicas sobre medio ambiente.
- Planeamiento urbanístico: instrumento fundamental de protección del medio ambiente urbano.

El acercamiento del agua potable a la población y el alejamiento del agua residual han sido funciones típicamente municipales desde los tiempos más remotos. Así, por ley, las aguas residuales urbanas son las aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial (García Gil, 2007). Por lo tanto, hoy en día es necesario reformar el marco legal para facilitar la gestión separada de las aguas pluviales mediante la generalización del uso de SUDS, clarificando las correspondientes responsabilidades de construcción y mantenimiento.

El desarrollo de legislación adecuada y la generalización de estos sistemas tan sólo es posible mediante la creación de grupos de trabajo expertos con amplias redes de colaboración (National SUDS Working Group, 2003). Estos grupos generan documentos de síntesis de gran importancia, recogiendo desde los aspectos legales hasta los aspectos técnicos básicos: glosario, descripciones, normas y detalles de diseño, legislación, responsabilidades de

mantenimiento, garantías, bibliografía, organizaciones vinculadas, acrónimos y sitios de Internet relacionados.

1.4.2.2 *Formación*

La limpieza de las calles se ha considerado históricamente como uno de los aspectos más importantes para la mejora de la calidad de la escorrentía urbana (Temprano *et al.*, 1996). Esta limpieza depende fundamentalmente de la educación y actitud de los ciudadanos. Para asegurar una correcta limpieza urbana son fundamentales costumbres como la recogida de los excrementos de animales de compañía, el uso de las papeleras para cualquier residuo o el no sacudir el polvo doméstico por las ventanas. Las normativas municipales y las sanciones impuestas ayudan a instaurar estos comportamientos, pero como en todo cambio de mentalidad son fundamentales las campañas de publicidad y concienciación (Jiménez, 1999).

Es de destacar el papel primordial que juega la formación de los propietarios particulares de instalaciones como gasolineras, talleres, desguaces y zonas industriales, así como de las autoridades encargadas de su control, en la gestión adecuada de las aguas de lluvia. Estos lugares deben estar provistos de separadores de hidrocarburos y balsas de retención para hacer frente a posibles vertidos accidentales. Estas instalaciones de tratamiento de la escorrentía superficial contaminada no sólo sirven para evitar multas, sino también para evitar problemas ambientales de contaminación difusa. Por ello no basta únicamente con la instalación de los sistemas adecuados, sino que es necesario su correcto mantenimiento y control para asegurar su funcionamiento a lo largo del tiempo.

1.4.2.3 *Inversión*

Las administraciones públicas, y en especial las autoridades municipales, deben contar con una partida del presupuesto anual que permita elaborar y hacer cumplir adecuadamente las normativas pertinentes que faciliten la generalización de la aplicación del drenaje urbano sostenible, así como realizar las campañas de formación y publicidad necesarias para implicar a toda la sociedad en resolver un problema que es de todos.

Sin un adecuado nivel de inversión económica por parte de las administraciones públicas no es posible afrontar la elaboración de manuales de construcción y programas de seguimiento de los sistemas de drenaje urbano. Además, en todos los casos es necesario dedicar parte de esta inversión al mantenimiento de los sistemas construidos para asegurar su correcto funcionamiento a lo largo del tiempo.

I.4.3 SISTEMAS DE INFILTRACIÓN

Los sistemas de infiltración o de control en origen implican infiltración superficial de la escorrentía superficial. Para validar la infiltración al terreno es necesario asegurar su correcto rendimiento mediante un estudio completo del tipo de suelo, su permeabilidad y la situación del nivel freático. Además, estos sistemas no deben situarse a menos de cinco metros de distancia de un edificio o carretera para evitar que el agua infiltrada afecte a las cimentaciones de dichas estructuras. Las técnicas de control en origen están diseñadas para atajar desde el inicio la formación de la escorrentía superficial. Con la aplicación de estos sistemas se pretende recuperar para las ciudades la capacidad de infiltración de los suelos naturales. Esto se consigue aumentando el porcentaje de superficie permeable en la ciudad mediante zonas verdes, pavimentos permeables, depósitos de infiltración y pozos o zanjas de infiltración (CIRIA, 2001; Pratt *et al.*, 2002; Fernández *et al.*, 2003; Wilson *et al.*, 2004).

I.4.3.1 Superficies permeables

Una superficie permeable es cualquier área que permite la infiltración del agua. Las superficies permeables pueden ser resistentes al tráfico o no. Las resistentes al tráfico reciben el nombre de pavimentos permeables, siendo firmes permeables si todas las capas de la sección resistente permiten el paso del agua. Por su parte, las superficies permeables que no tienen misión resistente forman parte de paseos, parques, jardines, alcorques, glorietas, cubiertas verdes, etc.

I.4.3.2 Pozos y zanjas de infiltración

Pozos y zanjas de infiltración son perforaciones y trincheras rellenas de material drenante con un alto índice de huecos cubierto por una superficie permeable. Las zanjas son más estrechas y menos profundas que los pozos, siendo más eficientes desde el punto de vista constructivo (National SUDS Working Group, 2003).

I.4.3.3 Depósitos de infiltración

Los depósitos de infiltración son superficies permeables deprimidas que constituyen embalses superficiales donde se concentra y almacena el agua de lluvia hasta que se produce su infiltración. Su forma es irregular con taludes laterales suaves cubiertos de vegetación. Los depósitos de infiltración se diseñan para albergar volúmenes mayores que los pozos y las zanjas de infiltración gestionando cuencas mayores (CIRIA, 2001).

1.4.4 SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y TRANSPORTE

Los sistemas de captación y transporte de aguas pluviales sirven para recoger y conducir lentamente la escorrentía superficial. Estos sistemas están diseñados para permitir los procesos naturales de oxigenación, filtración, almacenamiento, infiltración y evaporación del agua a lo largo del trayecto, con la consiguiente laminación de la cantidad y mejora de calidad del agua (CIRIA, 2001; Wilson *et al.*, 2004). Estos sistemas pueden ir recubiertos inferiormente por un geosintético que puede ser bien un geotextil permeable, si las condiciones del terreno permiten la infiltración directa, o bien una geomembrana impermeable, si la infiltración del agua al terreno no es recomendable. Existen dos tipos principales:

- Subterráneos: drenes filtrantes (filter drains).
- Superficiales: cunetas verdes (swales) y franjas filtrantes (filter strips).

1.4.4.1 Drenes filtrantes

Los drenes filtrantes, también conocidos como drenes franceses, son zanjas continuas recubiertas de geosintético y rellenas de grava que captan y conducen las aguas pluviales. Estas zanjas pueden contar además con una tubería permeable embebida en el material granular para facilitar la circulación del agua en su interior. Estos sistemas son usados comúnmente para la captación y drenaje de las aguas pluviales en carreteras.

1.4.4.2 Cunetas verdes

Las cunetas verdes se definen como cauces naturalizados que captan y conducen el agua de escorrentía superficial de forma lenta y controlada, fomentando la oxigenación y la retención del agua. A diferencia de las cunetas de hormigón, las cunetas verdes están cubiertas de vegetación y rocas, son más anchas y permiten la reducción de la velocidad del flujo de agua, constituyendo además un refugio natural para anfibios como sapos y tritones.

1.4.4.3 Franjas filtrantes

Una franja filtrante es una superficie vegetada con cierta inclinación que permite el flujo lento de la lámina de escorrentía superficial asegurando un efecto filtro gracias a la cobertura vegetal. Así, por ejemplo, el césped puede filtrar la escorrentía superficial y retardar su flujo, ayudando a que se produzcan los procesos de infiltración, evaporación y evapotranspiración. Generalmente, una franja filtrante con mayor anchura y densidad de vegetación se obtiene mayor capacidad filtrante y grado de depuración.

I.4.5 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Los sistemas de almacenamiento permiten gestionar grandes cuencas urbanas proporcionando una laminación de la cantidad de aguas pluviales, una depuración de su calidad mediante procesos naturales y un servicio a la comunidad aportando un valor paisajístico y natural al entorno urbano (Jiménez, 1999; EPA, 1999a; Dreiseitl *et al.*, 2001). Además estos sistemas suponen una medida de seguridad adicional en áreas industriales, carreteras y zonas con riesgo de vertidos, dado que permiten atrapar derrames accidentales (CIRIA, 2001; Wilson *et al.*, 2004). Según la presencia continua de la lámina de agua pueden agruparse en:

- Sin lámina permanente de agua: depósitos de detención (detention basins).
- Con lámina permanente de agua: estanques de retención (retention ponds) y humedales artificiales (wetlands).

I.4.5.1 Depósitos de detención

Los depósitos de detención son depresiones superficiales naturalizadas que permiten albergar un volumen de agua, laminando el flujo de escorrentía y reduciendo los riesgos de inundación. Pueden considerarse como tanques o depósitos de tormenta superficiales o como zonas inundables controladas. Estos depósitos deben estar adecuadamente naturalizados y contar con un sistema de desagüe que permita su completa descarga.

I.4.5.2 Estanques de retención

Los estanques de retención son embalses superficiales poco profundos con una lámina de agua permanente. Esta lámina de agua oculta los bancos de sedimentos antiestéticos y permite un tiempo de retención del agua en el estanque que incrementa el rendimiento de depuración. Además debe existir un mínimo de corriente controlando el caudal de entrada y de salida.

I.4.5.3 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son superficies cubiertas de agua con poca profundidad, dotadas de abundante vegetación propia de pantanos y zonas húmedas. El tiempo de retención del agua en los humedales es aún mayor que en los estanques de retención por lo que se obtiene un mayor grado de depuración. Es fundamental destacar que en ningún caso los humedales naturales deben recibir directamente el flujo de escorrentía superficial urbana, sólo los humedales artificiales están preparados para esta tarea.

I.4.6 LA CADENA DE DRENAJE SOSTENIBLE

La aplicación de sistemas de drenaje sostenible de forma aislada carece de sentido en la mayor parte de los casos. Estos sistemas deben ser combinados para constituir una cadena completa de tratamiento y gestión de aguas pluviales, bien unos con otros o bien complementando las infraestructuras de drenaje convencional existentes (Wilson *et al.*, 2004). Por ejemplo, las franjas filtrantes pueden ser utilizadas como pretratamiento para eliminar el exceso de sólidos previamente al transporte del agua mediante cunetas verdes hasta un estanque de retención, asegurando una adecuada laminación y depuración del flujo de aguas pluviales. Por tanto, cualquier combinación de sistemas es posible aunando y potenciando las características y ventajas de cada uno para adaptar la cadena resultante a unas condiciones específicas de aplicación. La selección de los eslabones más adecuados no es sencilla, pues se trata de un proceso multidisciplinar en el que hay que tener en cuenta factores tradicionalmente relegados a un segundo plano como la calidad paisajística, el entorno arquitectónico o la influencia del uso del suelo urbano (National SUDS Working Group, 2003).

Debe existir una serie de objetivos claros desde el inicio que permita fijar el criterio de diseño. La planificación de la cadena de drenaje sostenible requiere de una clara voluntad de integración medioambiental de los sistemas de drenaje en el entorno. Así, el criterio de diseño debe equilibrar las componentes relacionadas con la cantidad de agua, su calidad y el servicio ofrecido a la sociedad (CIRIA, 2001).

Existen unas premisas básicas a la hora de planificar y seleccionar los diferentes sistemas que han de constituir los eslabones de la cadena de drenaje sostenible de las aguas pluviales de una determinada área de actuación:

- El control en origen es fundamental en todos los casos y la infiltración al terreno es deseable siempre que sea posible.
- La captación y el transporte controlado de las aguas pluviales deben implicar el máximo posible de oxigenación, filtración, retención, infiltración y evaporación para disminuir la cantidad de agua a tratar y mejorar su calidad.
- Nunca se debe verter al medio natural sin pasar previamente por el número de eslabones necesarios para asegurar que se cumplen las condiciones marcadas previamente de cantidad, calidad y servicio.
- El diseño de cualquier cadena de drenaje sostenible debe ser funcional, durable y estético, teniendo en cuenta las necesidades de mantenimiento para garantizar su aceptación y conservación a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO II.- ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

II.1 FIRMES PERMEABLES

II.1.1 ANTECEDENTES

Los firmes permeables son un subconjunto importante y ampliamente estudiado dentro de los SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible) o BMPs (Best Management Practices o Buenas Prácticas Ambientales) (Pratt *et al.* 2002). En particular, los firmes permeables entran dentro de la categoría de sistemas de infiltración o de control en origen de la escorrentía superficial, siendo un tipo específico de superficies permeables. Además, los firmes permeables pueden considerarse como una cadena de drenaje sostenible completa por sí mismos, pues proporcionan infiltración, captación, transporte y almacenamiento, al permitir controlar en origen la escorrentía superficial, laminando los flujos de aguas pluviales y ofreciendo además un servicio a la sociedad como pavimentos estéticos, cómodos y seguros.

Los antecedentes de los firmes permeables se remontan fundamentalmente a la década de 1970. Desde entonces han sido múltiples los trabajos de investigación desarrollados en varios países que han dado lugar a monografías y manuales específicos.

En 1972 en Estados Unidos se llevó a cabo probablemente la primera investigación acerca de los firmes permeables (porous, pervious or permeable pavements). La utilización de firmes permeables tenía la intención de aliviar la contaminación debida a los vertidos de los sistemas de saneamiento unitarios en tiempos de lluvia, reduciendo además los parámetros de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano. Este primer análisis de laboratorio mostró como la mezcla bituminosa porosa era un material muy adecuado para la construcción de este tipo de pavimentos. Además, estudios económicos complementarios demostraron que las carreteras diseñadas con aglomerado poroso resultaban generalmente más económicas que las carreteras convencionales (Grover *et al.*, 1972). Actualmente, la monografía de Ferguson (2005), constituye una de las publicaciones más completas sobre firmes permeables. Redactada a partir de 800 referencias, 170 entrevistas con expertos y 280 análisis de aplicaciones reales, recoge la experiencia acumulada en Estados Unidos en lo que al uso de firmes permeables se refiere. Esta publicación analiza en capítulos separados la durabilidad y funcionalidad de cada uno de los tipos de firmes permeables. Posteriormente, Ferguson (2006) ha llegado a afirmar que los firmes permeables son la técnica de restauración urbana con mayor desarrollo, mayor controversia y mayor radicalidad de las aplicadas actualmente.

En el Reino Unido, Pratt *et al.* (1989) recogen la experiencia de varios años en el uso de firmes permeables para la reducción de la escorrentía superficial urbana y la mejora de su calidad. Posteriormente, destaca la publicación del primer manual integramente dedicado a la

técnica de los firmes permeables. Este manual, elaborado por Pratt *et al.* (2002) para la asociación de la construcción CIRIA, recoge más de 20 años de experiencia en el diseño y construcción de firmes permeables, abordando todos y cada uno de los aspectos relacionados con los mismos, desde los conceptos básicos hasta las consideraciones de mantenimiento a largo plazo. Por su parte, McCormack (2006) recoge en su web información eminentemente práctica sobre materiales y métodos de ejecución de pavimentos urbanos, incluidos los firmes permeables, con una completa lista de fabricantes especializados en el Reino Unido.

En Irlanda, McBride y Knapton (2006) defienden el uso de firmes permeables para cumplir con los requerimientos de las autoridades locales de que cualquier nuevo desarrollo no añada caudales adicionales al sistema de drenaje urbano, manteniendo los niveles de permeabilidad previos al desarrollo.

En Francia, los firmes permeables o estructuras embalse (*chaussées ou structures réservoirs*) tienen un marcado carácter de almacenamiento (del Val Melús, 1990). Estas estructuras embalse fueron fundamentalmente desarrolladas desde 1978 en el área urbana de Burdeos, extendiéndose posteriormente desde allí a otras regiones del país galo (Raimbault *et al.*, 1982; Raimbault *et al.*, 1985; Goacolou, 1993). Las investigaciones sobre firmes permeables llevadas a cabo en Francia en las décadas de 1980 y 1990 quedan resumidas en la segunda parte de la publicación de Legret (2001), editada por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC). Esta monografía, centrada en su primera parte en los contaminantes arrastrados por la escorrentía superficial urbana y en los problemas de contaminación difusa que causan, analiza el uso de firmes permeables fundamentalmente orientado a la mejora de la calidad del agua y su almacenamiento.

En Alemania, los firmes permeables han sido utilizados desde los años setenta y actualmente son un método de construcción regulado (Steffen y Meinheit, 2006). El control de la contaminación del agua es el principal aspecto estudiado hoy en día en este país (Dierkes *et al.*, 2002, Dierkes *et al.* 2005; Fach y Geiger, 2005).

Así, mientras en otros países existen monografías y guías específicas de recomendaciones sobre el diseño y construcción de firmes permeables, en España no existen actualmente manuales sobre la aplicación de este tipo de técnicas de construcción sostenible al drenaje urbano. Como ejemplo comentar como la completa guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano publicada por el CEDEX (2007) no incluye ninguna mención al empleo de firmes permeables, ni de ningún otro SUDS para la gestión de aguas pluviales.

II.1.2 DEFINICIÓN Y APLICACIÓN

Los firmes permeables se pueden definir 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.

No son consideradas como firmes permeables aquellas secciones que cuentan con capas drenantes combinadas con capas impermeables, como por ejemplo mezclas bituminosas porosas sobre mezclas bituminosas cerradas o semicerradas. Estos firmes quedan excluidos puesto que la misión de la capas drenantes es únicamente la evacuación del agua hacia los laterales, sin permitir su filtración ni almacenamiento en las capas inferiores del firme. Además, de acuerdo con McCormack (2006), no se consideran como firmes permeables las superficies de césped que, aún resistiendo un determinado tráfico, no permitan una buena infiltración del agua por una excesiva presencia de limos, arcillas o materia orgánica.

Los firmes permeables son una alternativa sostenible a los firmes impermeables, contruidos ambos con los mismos materiales de construcción: mezcla bituminosa, hormigón, adoquines, áridos, geosintéticos, etc. La principal diferencia entre ambos tipos de firmes es la permeabilidad de la disposición de dichos materiales de construcción en las diferentes capas.

Respecto a su aplicación, los firmes permeables han sido fundamentalmente utilizados en aparcamientos de vehículos ligeros y en carreteras de bajas intensidades de tráfico (Field *et al.*, 1982). Hay que destacar las aplicaciones que los firmes permeables tienen en zonas de nuevo desarrollo, disminuyendo el incremento en la escorrentía que recibe el sistema de alcantarillado existente. Así, dentro de las ciudades, los firmes permeables son fundamentalmente utilizados en estacionamientos y calles de bajo tránsito (de Solminihac y Castro, 2002). También son de aplicación los firmes permeables en emplazamientos donde ni siquiera existe una red de saneamiento, como áreas recreativas en parques naturales u otras áreas protegidas. En estas zonas aisladas, los firmes permeables ayudan a controlar la contaminación provocada por los vertidos de los vehículos en las áreas de estacionamiento y carreteras de acceso (Valle *et al.*, 2006).

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

II.1.3 CLASIFICACIÓN

A la hora de catalogar los distintos tipos de firmes permeables son numerosos los criterios de agrupación que se pueden emplear. Sin embargo, los dos más utilizados son el tipo de pavimento permeable del firme y el destino final del agua infiltrada por el mismo.

Pratt *et al.* (2002) presentan probablemente la clasificación más completa de firmes permeables atendiendo al tipo de pavimento o superficie:

- Opciones de superficies porosas (porous surfacing options):
 - Suelos abiertos o materiales granulares con refuerzos geosintéticos celulares de confinamiento (open-texture soil or granular material with geosynthetic cellular confinement systems).
 - Grava o césped protegidos con sistemas geosintéticos (geosynthetic gravel/grass protection systems).
 - Adoquines y baldosas porosos (small porous elemental surfacing blocks).
 - Materiales porosos de puesta en obra continua: asfalto poroso, hormigón poroso o áridos con ligante sintético (continuous-laid porous material: porous asphalt, porous concrete or resin-bound aggregate).
- Opciones de superficies permeables (permeable surfacing options):
 - Elementos prefabricados de hormigón de gran tamaño: césped con hormigón (large elemental surfacing blocks: grass concrete).
 - Adoquines y baldosas (small elemental surfacing blocks).
 - Materiales permeables de puesta en obra continua: sistemas de hormigón fabricado in-situ (continuous-laid permeable materials: in-situ cast concrete systems).

Por su parte, Ferguson (2005) hace referencia a nueve tipos de pavimentos permeables:

1. Áridos porosos (porous aggregate).
2. Césped poroso (porous turf).
3. Celdas de plástico (plastic geocells).
4. Adoquines con juntas abiertas (open-jointed paving blocks).
5. Entramados prefabricados de hormigón (open-celled paving grids).
6. Hormigón poroso (porous concrete).
7. Asfalto poroso (porous asphalt).
8. Superficies permeables ligeras (soft porous surfacing)
9. Caminos de madera (decks).

McCormack (2006), divide los pavimentos permeables en dos tipos fundamentales:

1. Pavimentos construidos por materiales impermeables convencionales con huecos o ranuras que permiten la infiltración del agua a través de la superficie.
2. Pavimentos construidos con elementos o materiales porosos.

Mientras, el departamento de transportes de California (Caltrans, 2007) clasifica los firmes permeables en cuatro categorías, según el tipo de pavimento permeable empleado o el uso de capas drenantes subterráneas:

1. Asfalto poroso.
2. Hormigón poroso.
3. Adoquines permeables.
4. Estructuras de drenaje subterráneo (subsurface drainage structures).

Respecto al criterio de clasificación en función del destino final del agua infiltrada, se distinguen fundamentalmente dos posibilidades (Hollinrake, 1991, Pratt, 1999a; CIRIA, 2001; de Solminihaç y Castro, 2002):

- Infiltración del agua al terreno para la recarga de acuíferos naturales, siempre que sea posible.
- Almacenamiento del agua en la capa subbase del firme.

Scholz *et al.* (2007) dan prioridad al primer destino posible, destacando que el principal objetivo de los firmes permeables es recoger y tratar cualquier escorrentía superficial urbana, infiltrándola para recargar los acuíferos

Por su parte, McCormack (2006) señala tres posibles sistemas de drenaje final del agua infiltrada por los firmes permeables:

- Infiltración directa al terreno sin ningún otro tipo de sistema de drenaje.
- Sistema de drenaje subterráneo adicional.
- Sistema de drenaje superficial adicional.

En resumen, analizando los distintos tipos posibles de firmes permeables, estos se pueden clasificar en dos categorías fundamentales según su pavimento permeable. La primera categoría estaría formada por aquellos pavimentos que combinan zonas impermeables con zonas permeables, como por ejemplo los adoquines impermeables dispuestos con separadores. Mientras, la segunda categoría la constituirían los pavimentos permeables con una capacidad de infiltración homogénea en toda su superficie, como por ejemplo las superficies continuas de mezcla bituminosa porosa.

Por tanto, la clasificación propuesta para los firmes permeables en función del tipo de

pavimento permeable con el que están contruidos se realiza en dos categorías fundamentales claramente diferenciadas:

1. Firmes permeables con pavimentos permeables discontinuos.
2. Firmes permeables con pavimentos permeables continuos.

Los pavimentos permeables discontinuos se definen como aquellos formados por elementos o materiales impermeables que, combinados o no con materiales porosos, permiten la infiltración del agua a través de huecos, espacios o ranuras de la superficie, asegurando una adecuada capacidad portante. Se incluyen en esta primera categoría los siguientes pavimentos permeables:

- Césped poroso o grava con refuerzos:
 - Prefabricados de hormigón: retículas, parrillas o celdas de hormigón con los huecos ocupados por césped o grava.
 - Prefabricados de plástico: retículas, parrillas o celdas de plástico con los huecos ocupados por césped o grava.
- Adoquines con ranuras o juntas abiertas:
 - Rellenas de material drenante: adoquines con separadores o sin ellos con las juntas ocupadas por gravilla o césped poroso.
 - Libres: adoquines con pequeñas ranuras incluidas en su geometría que no se rellenan con ningún tipo de relleno drenante.

Los pavimentos permeables continuos se definen como aquellos formados únicamente por materiales porosos que permiten la infiltración del agua a través de toda la superficie por igual, asegurando una adecuada capacidad portante. En esta categoría están incluidos los pavimentos permeables contruidos con:

- Mezcla bituminosa porosa:
 - Convencional: fabricada con algún tipo de betún convencional como por ejemplo el B 60/70.
 - Modificada: fabricada con algún betún modificado con polímeros como por ejemplo el BM-3b.
- Hormigón poroso:
 - Hidráulico: fabricado con cemento hidráulico como conglomerante de los áridos.
 - Sintético: fabricado con ligante sintético a base de resinas encargado de ligar el esqueleto mineral adecuadamente.

Respecto al destino final del agua infiltrada a través del pavimento permeable, se propone una clasificación complementaria que distingue tres tipos de firmes permeables:

- Firmes permeables con infiltración: son aquellos que permiten la infiltración al

terreno del agua infiltrada y filtrada a través de todas las capas permeables del firme, incluida la explanada, con el objetivo de permitir la recarga de las reservas naturales de aguas subterráneas.

- Firmes permeables con almacenamiento: son aquellos que están diseñados y construidos para permitir el almacenamiento de un determinado volumen de agua en la capa subbase, con el objetivo de su posterior valorización mediante su reutilización en usos no potables.
- Firmes permeables con drenaje diferido: son aquellos que cuentan con un sistema de drenaje subterráneo compuesto por tuberías permeables, con el objetivo de retardar el flujo de aguas pluviales, laminando las puntas de caudal en los sistemas de saneamiento a los que están conectados.

Uniendo los dos criterios de clasificación propuestos, los firmes permeables se clasificarían en doce posibles tipos, resultado de combinar los cuatro tipos fundamentales de pavimentos permeables con las tres opciones de gestión del agua consideradas. La clasificación propuesta de firmes permeables se resume en la Tabla II-1. Así, por ejemplo, un firme permeable tipo B3 correspondería a un pavimento permeable de adoquines con ranuras que cuenta con un sistema de drenaje diferido en las capas inferiores.

Tabla II-1. Clasificación propuesta de firmes permeables.

Según el pavimento permeable		Según el destino final del agua
Pavimentos permeables discontinuos	A. Césped o grava con refuerzos	1. Infiltración
	B. Adoquines con ranuras	
Pavimentos permeables continuos	C. Mezcla bituminosa porosa	2. Almacenamiento
	D. Hormigón poroso	3. Drenaje diferido

II.1.4 VENTAJAS

El empleo de firmes permeables ofrece un gran número de ventajas, muchas de las cuales ya han sido expuestas. Además, todas ellas deben sumarse a las ventajas generales que ofrecen los SUDS y que han sido comentadas en la introducción.

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

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

Según Ferguson (2005) los firmes permeables prometen:

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

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

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

vida requeridos.

- En general, constituyen una solución más barata que la combinación de superficies impermeables y sistemas de drenaje convencionales.

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

Respecto a la gestión de la cantidad de aguas pluviales, el uso de firmes permeables ofrece reducciones de coste al minimizar la generación de escorrentía superficial y por tanto las dimensiones de cunetas, sumideros y otros elementos parte del sistema de alcantarillado (Grover *et al.*, 1972; Field *et al.*, 1982). Además, los firmes permeables ofrecen un ahorro económico durante la ejecución, dado que no requieren de nivelación de la superficie para dirigir el drenaje, ni tampoco necesitan la colocación de sumideros ni alcantarillas (National SUDS Working Group, 2003).

En cuanto a la depuración que ofrecen los firmes permeables, diversos estudios han demostrado que su empleo mejora de forma significativa la calidad de las aguas que los atraviesan (Pratt *et al.*, 1995; Pratt *et al.*, 1996; Pratt *et al.*, 1999; Newman *et al.*, 2002; Puehmeier *et al.*, 2004; Bayón *et al.* 2005). Los hidrocarburos contenidos en la escorrentía urbana son retenidos en el interior de los firmes permeables, pudiendo llegar a ser biodegradados con el paso del tiempo (Newman *et al.*, 2003; Coupe *et al.*, 2003; Bayón *et al.* 2005; Newman *et al.*, 2006). Los firmes permeables también son capaces de retener los metales pesados que arrastra la escorrentía superficial urbana, principalmente procedentes de tejados (cobre y zinc) o carreteras (plomo), asegurando una correcta calidad del agua infiltrada, aún cuando el nivel freático está próximo (Fach y Geiger, 2005).

Los firmes permeables ofrecen también ventajas sociales, completando el triángulo de economía, medio ambiente y sociedad del desarrollo sostenible. Estas ventajas de servicio de los firmes permeables son, aparte de las mejoras estéticas, el aumento de la seguridad y de la comodidad de los ciudadanos en tiempos de lluvia, reduciendo el riesgo de accidentes de tráfico. Además, los firmes permeables permiten el almacenamiento del agua de lluvia para su posterior reutilización o eliminan del riesgo de accidentes con los carros de la compra en los aparcamientos de centros comerciales, principalmente debidos a la inclinación de drenaje necesaria en las superficies impermeables (McBride y Knapton, 2006).

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

(Pérez Jiménez *et al.*, 1982; Gordillo, 2001):

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

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

Por último, se destacan algunas ventajas particulares de cada una de las dos categorías principales de firmes permeables:

- Firmes permeables con pavimentos discontinuos:
 - Excelente estética: probablemente los pavimentos de adoquines sean los más versátiles y los que mejor acabado ofrecen.
 - Restitución sencilla: el carácter modular de este tipo de pavimentos permite la fácil restitución de los elementos dañados.
- Firmes permeables con pavimentos continuos:
 - Menor coste de ejecución por metro cuadrado: los materiales empleados son baratos y basta con poca mano de obra.
 - Puesta en obra rápida y cómoda para grandes superficies: la puesta en obra de los aglomerados porosos es continua, rápida y sencilla.

II.1.5 INCONVENIENTES

A pesar de todas sus ventajas, los firmes permeables también presentan problemas que deben ser estudiados y tenidos en cuenta. Los principales inconvenientes comunes a todos los firmes permeables son:

- Colmatación.
- Degradación.
- Desconocimiento y desconfianza.

Debido a los dos primeros inconvenientes existen una serie de limitaciones en el uso de los firmes permeables. El riesgo de colmatación está determinado por el aporte total de sedimentos a la superficie. Este aporte es función de múltiples variables como la proximidad de materiales sueltos, la acción del viento o el régimen de precipitaciones. Como precaución, no es conveniente utilizar firmes permeables en regiones áridas, con alta erosión o actividad eólica. También se limita el uso de firmes permeables en zonas con suelos impermeables, regiones con abundantes ciclos hielo-deshielo o zonas de alto tráfico para evitar el riesgo de degradación estructural de la sección del firme (EPA, 1999b). Además, en los firmes permeables con infiltración de agua al terreno, se deben evaluar los posibles riesgos de contaminación de aguas subterráneas (Hogland *et al.*, 1987).

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

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

Con todo, los principales inconvenientes de los firmes permeables, al igual que del resto de los SUDS, son el desconocimiento y la desconfianza debida a las experiencias fallidas. Un análisis realizado por Schlüter y Jefferies (2001) pone de manifiesto que los problemas que presentan los firmes permeables son fundamentalmente debidos a un inadecuado diseño y ejecución. Ferguson (2006) señala que el buen funcionamiento de un firme permeable depende de una correcta selección, diseño, ejecución y mantenimiento de los elementos que lo componen, y los fallos de capacidad portante o de bloqueo resultan de negligencias en alguno de estos pasos. Por su parte, Steffen y Meinheit (2006) señalan que los errores y la falta de calidad en ejecuciones de firmes permeables se deben fundamentalmente a las faltas de formación y de control, unidas a la presión de los plazos de ejecución. Por ejemplo, es fundamental saber que las características de los materiales de construcción

empleados en los firmes permeables son distintas a las de los empleados en los firmes impermeables dado que deben permitir el paso del agua, asegurando la durabilidad del firme (Shackel, 2006).

En particular, Pérez Jiménez *et al.* (1982) y Gordillo (2001) señalan algunos inconvenientes y limitaciones de uso de las mezclas bituminosas porosas:

- Progresiva colmatación: no deben usarse en pavimentos con riesgo de colmatación, como por ejemplo vías agrícolas o de tráfico lento.
- Riesgo de deslizamiento en los primeros meses: hasta que desaparece la película de ligante que envuelve el árido superficial.
- Mala resistencia a los esfuerzos tangenciales del tráfico: no deben usarse en vías urbanas, cruces, glorietas, zonas de frenada, etc.
- Problemas en climas fríos: no deben usarse en zonas con posibilidad de heladas.
- Dificultad de regularización: no deben usarse en vías con deficiente soporte.
- Penetración por disolventes: no deben usarse en zonas con riesgo de contaminación con carburantes, como por ejemplo tramos con atascos frecuentes, zonas de peaje, estaciones de servicio o paradas de autobuses.

De estos inconvenientes, el riesgo de deslizamiento, la mala resistencia a los esfuerzos tangenciales y la afección de los disolventes pueden ser solucionados sustituyendo la mezcla porosa por hormigón poroso, si bien este puede ser degradado químicamente por las sales de deshielo, debiendo ser reforzado con polímeros (del Val Melús, 1990; Aguado, 1995).

Algunos inconvenientes particulares de cada categoría de firme permeable son:

- Firmes permeables con pavimentos discontinuos:
 - Mayor coste de ejecución: debido al coste de los materiales.
 - Puesta en obra lenta y laboriosa: normalmente manual.
 - Pueden resultar incómodos de pisar y de rodar con ruedas pequeñas: debido a discontinuidades excesivas.
- Firmes permeables con pavimentos continuos:
 - Estética limitada: dado que ofrecen un acabado continuo.
 - Dificil restitución: requiere fresado, limpieza y bacheado.

En cualquier caso, se debe hacer frente a estos inconvenientes mediante trabajos de investigación y publicaciones que permitan generalizar la construcción eficiente de los firmes permeables. Ferguson (2006) afirma que la investigación científica y la experiencia práctica sobre firmes permeables han disipado los rumores y especulaciones que hace tiempo limitaron su adecuada aplicación.

II.2 SECCIONES PERMEABLES

II.2.1 PAVIMENTOS PERMEABLES

El pavimento o superficie artificial de un firme permeable debe ser también permeable para asegurar la infiltración de las aguas pluviales. A continuación se describen cada uno de los cuatro tipos principales de pavimentos permeables que constituyen las dos categorías de la clasificación propuesta para los firmes permeables (Tabla II-1):

- Pavimentos permeables discontinuos.
 - Césped o grava con refuerzos.
 - Adoquines con ranuras.
- Pavimentos permeables continuos.
 - Mezcla bituminosa porosa.
 - Hormigón poroso.

II.2.1.1 Césped o grava con refuerzos

El césped reforzado es, sin duda, el pavimento permeable más utilizado actualmente debido a su estética verde con implicaciones ecológicas. Sin embargo, en muy pocas de las aplicaciones actuales en España se puede considerar que el césped reforzado forme parte de un firme permeable pues, en la mayoría de ellas, el césped está mal conservado y la tierra vegetal en la que se asienta es prácticamente impermeable. Además, la falta de un correcto diseño de la sección completa del firme provoca normalmente la rotura del refuerzo empleado dando la sensación de falta de capacidad portante (Figura II-1).

Los refuerzos empleados para permitir el tráfico ligero sobre el césped o la grava pueden ser de hormigón o plástico. Los refuerzos de hormigón ofrecen una mayor resistencia a los esfuerzos tangenciales originados por el tráfico frenando, acelerando y maniobrando, mientras que los refuerzos de plástico permiten un mejor desarrollo de las raíces del césped que protegen (Figura II-2).

Actualmente, las estructuras de plástico han mejorado sus resistencias hasta valores de 150 y 350 t/m² según Atlantis (2008) y Ecovegetal (2007), demostrando además mejores acabados que los prefabricados de hormigón. Por estas razones, sus aplicaciones son cada día más abundantes. Sin embargo, la amplia oferta, variedad y arraigo de los refuerzos prefabricados de hormigón impide la igualdad en el mercado.



Figura II-1. Césped con refuerzos de hormigón, aparcamiento de la playa de Loredo, Cantabria.



Figura II-2. Césped con refuerzos de plástico, aparcamiento del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón, Asturias.

II.2.1.2 Adoquines con ranuras

Los adoquines con ranuras son bloques prefabricados de hormigón diseñados o dispuestos de forma que la superficie final disponga de canales para la infiltración vertical del agua. Estos canales pueden rellenarse con material drenante o dejarse libres.

Las juntas o espacios entre adoquines suelen ser mayores cuando van a rellenarse con material drenante, pudiendo utilizar separadores entre adoquines para facilitar su colocación. Por el contrario, cuando las juntas se dejan libres, el tamaño de las ranuras para la infiltración se minimiza (Figura II-3).



Figura II-3. Adoquines de Bloques Montserrat con ranuras libres, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander.

En este tipo de pavimentos permeables pueden incluirse también los bloques prefabricados de hormigón poroso. Estos adoquines porosos se encuentran actualmente en desuso debido a su alto coste de producción, siendo sustituidos actualmente por soluciones más baratas como los pavimentos continuos de hormigón poroso impreso, los cuales ofrecen acabados de estética semejante (Ecocreto, 2007).

II.2.1.3 Mezcla bituminosa porosa

Según el porcentaje de huecos (H), las mezclas bituminosas se agrupan en (Gordillo, 2001; Kraemer *et al.*, 2004):

- Densas o cerradas: $H < 6\%$.
- Semidensas o semicerradas: $H = 6-12\%$.
- Abiertas: $H > 12\%$.
- Porosas o drenantes: $H > 20\%$.

Las mezclas bituminosas porosas (Figura II-4) fueron desarrolladas en Francia en 1968, donde la experiencia mostró que al cabo de diez años, aún colmatadas, mantenían una buena rugosidad superficial y un aceptable drenaje superficial. A mediados de los años setenta, la utilización de betunes modificados con polímeros permitió mejorar sus características reológicas y de adherencia aumentando su cohesión y disminuyendo su susceptibilidad térmica. No obstante, debido a la confrontación entre ventajas e inconvenientes, el desarrollo de esta técnica en Francia se bloqueó hasta 1985 cuando, gracias a la acción de determinadas asociaciones de automovilistas, se retomó su aplicación e investigación (Brule *et al.*, 1993). Así, son numerosas las aplicaciones posteriores de los pavimentos porosos urbanos (chaussées poreuses urbaines) para reducir el ruido, como por ejemplo las realizadas en la región de Rhône (Pipien *et al.*, 1990).

En España, las mezclas bituminosas porosas se utilizan en carreteras desde 1980 como capa de rodadura drenante, con espesores de 3 o 4 cm (MOPU, 1987), e incluso de 5 cm, cuando el tamaño máximo de los áridos es de 12 mm (del Val Melús, 1990).

Posteriormente, con el paso de los años, la experiencia y la investigación, el uso de mezclas bituminosas se ha extendido por todo el mundo, adaptándose a todo tipo de condiciones climáticas y técnicas correspondientes a países como Suiza, Japón, Malasia o China (Tan, 2002; Poulikakos *et al.*, 2003).

Las principales conclusiones de los primeros estudios de laboratorio sobre las dosificaciones de mezclas bituminosas porosas fueron (Pérez Jiménez *et al.*, 1982):

- Aumentando el contenido de betún y de filler se limita la desagregación pero disminuye la porosidad de las mezclas resultantes.
- Según las proporciones, la porosidad disminuye más al aumentar el porcentaje de betún que al aumentar el contenido de filler.

Dependiendo de la granulometría de los áridos, en España se utilizaban inicialmente diversos tipos de mezclas drenantes de las cuales actualmente la normativa únicamente recoge la PA12 (PG-3, 2007). Esta mezcla tiene una granulometría abierta con un 10-15% de arena (pasa tamiz 2,5 mm), con lo que resulta un porcentaje de huecos en mezcla entre el 20% y el 25%.



Figura II-4. Mezcla bituminosa porosa, Laboratorio de Caminos de Santander.

Dependiendo del tipo de betún empleado para la fabricación del aglomerado se pueden distinguir dos tipos de mezclas porosas (del Val Melús, 1990):

- Con betún asfáltico convencional.
- Con betún asfáltico modificado.

En carreteras con baja intensidad de tráfico se emplean mezclas bituminosa porosas fabricadas con betunes convencionales. Estos betunes suelen ser el B 60/70 ó B 80/100, pero no más duros para no perder resistencia al desgaste superficial. Mientras, en vías de alta intensidad de tráfico se emplean ligantes modificados como los betunes BM-3a y BM-3b. Estos betunes con polímeros mejoran la resistencia a la disgregación del aglomerado y mantienen el volumen de huecos a lo largo del tiempo, paliando la densificación debida al tráfico y a las altas temperaturas. El contenido habitual de ligante es del 4,5% sobre árido y la relación filler-betún de 1 a 1,2 (Gordillo, 2001).

II.2.1.4 Hormigón poroso

El hormigón poroso (Figura II-5) supone una alternativa a la mezcla bituminosa porosa, tanto como capa superficial drenante, como pavimento de un firme permeable. Aguado *et al.* (1997) destacan como características fundamentales de un pavimento de hormigón poroso:

- La estructura porosa dependiente de la granulometría y de la dosificación.
- El conglomerante y el aditivo empleados.
- El espesor de la capa.



Figura II-5. Hormigón poroso hidráulico, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander.

Para que el hormigón sea considerado poroso debe tener un mínimo de 15% de huecos, sin sobrepasar el 25% para evitar problemas de estabilidad (de Solminihaç y Castro, 2002). No deben confundirse el hormigón poroso y el hormigón ligero con arcilla expandida. Ambos tienen un peso específico entre 1700 y 2000 kg/m³, sin embargo, el primero es el único con huecos accesibles interconectados que permiten el paso del agua (Aguado, 1995).

Las opciones de conglomerante son fundamentalmente dos: cemento hidráulico o ligante sintético. Ambos pueden ser modificados con distintos tipos de adiciones para mejorar sus prestaciones. El hormigón poroso hidráulico ofrece resistencias medias a compresión entre 15 y 20 MPa y permeabilidades entre 0,5 y 5 cm/s (Aguado, 1995). A nivel experimental Yang

y Jiang (2003) han logrado resistencias de 50 MPa mediante la adición de humo de sílice, superplastificante y polímeros orgánicos, obteniendo un hormigón poroso apto para todo tipo de viario urbano, bien en capas superficiales o de base. A nivel más práctico, existen aditivos registrados como por ejemplo el Ecocreto (2007) que es utilizado en México y permite alcanzar resistencias de 25 MPa. En cualquier caso, es necesaria la adición de polímeros o una mayor dotación de cemento para mantener un alto índice de huecos con una adecuada resistencia a los esfuerzos tangenciales del tráfico (Alegre Beneira y Xarles Romeu, 1996).

Por otra parte, están los aglomerados de áridos triturados, fundamentalmente provenientes del mármol, con ligantes sintéticos, compuestos de resinas seleccionadas para soportar las correspondientes cargas y condiciones atmosféricas. Estos pavimentos permeables están siendo utilizados con fines decorativos en jardines, glorietas y, fundamentalmente, en alcorques. Esta aplicación permite dar continuidad superficial a la acera, con el consiguiente incremento de seguridad y comodidad para los peatones (BaseFilt, 2008).

Existen gran número de investigaciones sobre el hormigón poroso hidráulico. En España este material ha sido estudiado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, por la ETSICCP de Madrid y por la ETSICCP de Barcelona. Aguado (1995) y Aguado *et al.* (1997) caracterizaron el comportamiento a fatiga del hormigón poroso según el tipo de polímero añadido, señalando las principales consideraciones que han de realizarse a la hora de su diseño. Por su parte, Pindado *et al.*, (1997) demuestran el mejor comportamiento a fatiga de los hormigones porosos con resinas acrílicas, aún con un mayor aumento de temperatura en su interior debido a las cargas repetidas. Mientras, en Argentina, el Instituto del Cemento Portland Argentino, señala el uso de este material tanto como capa de rodadura drenante, como parte de calzadas reservorio (firmes permeables), en EEUU, Suecia y Japón desde los años setenta (ICPA, 1999). Por su parte, Kuang *et al.* (2005) concluyen que la evolución de la permeabilidad del hormigón poroso no sólo depende de la porosidad total, sino de más parámetros que caracterizan los poros, como son la porosidad efectiva, la distribución de tamaños de poros o la tortuosidad. Actualmente, la investigación y aplicación del hormigón poroso en los Estados Unidos está presente en más de treinta estados, contando con la participación de diecisiete universidades, numerosas asociaciones del hormigón, empresas especializadas y administraciones locales (Brown, 2006).

Con todo, a pesar de las investigaciones, el coste económico del hormigón poroso ha hecho que su uso en capas de rodadura no se haya generalizado, siendo menos empleado que las mezclas bituminosas porosas. Así, este material ha quedado prácticamente relegado en España a aplicaciones específicas en pistas deportivas o usos decorativos.

II.2.2 CAPAS INFERIORES DE FIRMES PERMEABLES

Por debajo de las superficies permeables artificiales que sirven de pavimento, existen una serie de capas y elementos, también permeables, que completan la correspondiente sección del firme permeable.

Estas capas y elementos pueden ser:

- Capas granulares: bases y subbases compuestas por un determinado tipo de árido con una distribución de tamaños fijada.
- Estructuras de plástico: elementos resistentes de plástico con espesores variables.
- Geosintéticos: geotextiles, geomallas y geomembranas con misiones de filtro, separación, refuerzo o impermeabilización.

II.2.2.1 Capas granulares

Las capas granulares están exclusivamente constituidas por áridos que pueden ser (Kraemer *et al.*, 2004):

- Naturales: áridos rodados procedentes de graveras.
- Artificiales: áridos de machaqueo procedentes de canteras.
- Reciclados: subproductos industriales, de la construcción o de la demolición.

Estos áridos tienen una estructura granular, distribución de tamaños o granulometría que puede ser (Kraemer *et al.*, 2004):

- Uniforme: combinación de tamaños del mismo orden.
- Continua: combinación de tamaños de distinto orden de forma que unos rellenen los huecos de otros.

A pesar de su dificultad de manejo durante la ejecución, los áridos rodados con granulometría uniforme pueden llegar a ser adecuados como base de firmes permeables (McBride y Knapton, 2006). Sin embargo, es preferible utilizar áridos artificiales procedentes de cantera. Así, Hanson-Formpave (2008) especifica que los áridos de las capas base y subbase de sus firmes permeables deben ser de machaqueo, e indica la combinación de granulometrías uniformes y espesores que deben ser empleadas para las distintas capas.

Por su parte, las zahorras drenantes son estructuras continuas sin finos, con un porcentaje de huecos que asegura una alta permeabilidad. También existe la posibilidad de utilizar materiales reciclados como base o subbase de los firmes permeables. Estos materiales ofrecen ventajas ambientales asociadas a la construcción sostenible como son el ahorro de

materiales de cantera o la valorización de residuos inertes (Luaces Frades y Fernández Aller, 2006).

La elección entre los distintos tipos de áridos y sus granulometrías no sólo condiciona la permeabilidad y la resistencia de las capas granulares, sino también la retención de contaminantes y el posible almacenamiento del agua infiltrada en los huecos libres.

II.2.2.2 Estructuras de plástico

Las capas inferiores de un firme permeable también pueden estar compuestas por estructuras de plástico con la resistencia necesaria para recibir las cargas de las capas superiores y trasmitirlas a las capas inferiores. Las estructuras de plástico pueden tener diversos tamaños, que van desde cajones de 408 mm x 680 mm x 880 mm a celdas drenantes de 30 mm de altura (Atlantis, 2008). Estos módulos resisten repartiendo las cargas mediante sistemas de celosía y enganches machihembrados que aseguran la correcta trabazón entre las piezas de plástico.

Son múltiples las empresas que comercializan este tipo de productos en todo el mundo, destacando por su experiencia e inversión en investigación:

- Permavoid Limited en el Reino Unido (Figura II-6).
- Atlantis Corp. Internacional, con sede en Australia.



Figura II-6. Subbase de estructuras de plástico de Permavoid Limited (2008).

La principal ventaja que ofrecen las estructuras de plástico frente a las capas granulares es la mayor capacidad de almacenamiento de agua en su interior. Estos módulos ofrecen un porcentaje de volumen libre por encima del 90%, más del doble del 40% que pueden llegar a tener las capas granulares.

II.2.2.3 Geosintéticos

La importancia de los geosintéticos en los firmes permeables es crucial (Pratt, 2003). Los geosintéticos que se emplean son fundamentalmente:

- Geotextiles de filtro y separación: situados entre la base y la subbase, o entre la subbase y la explanada.
- Geomallas de refuerzo: embebidas en la subbase, para incrementar la trabazón de la misma y mejorar las características resistentes del pavimento.
- Geomembranas impermeables: colocadas sobre la explanada, para evitar el paso del agua, en caso de no ser posible la infiltración al terreno, o para crear un volumen estanco, que permita el almacenamiento del agua infiltrada.

La depuración del agua que tiene lugar en los firmes permeables se localiza fundamentalmente en los geotextiles utilizados como filtro y separación entre capas, siendo los encargados de retener la mayor parte de los contaminantes arrastrados por el agua infiltrada. Por ello, los geotextiles tienen un alto riesgo de colmatación (Hogland *et al.*, 1987; Legret *et al.*, 1996; Rommel *et al.*, 2001; Pratt, 2003; Bayón *et al.*, 2005).

Por su parte, las geomallas se utilizan como refuerzo para dotar de trabazón a las capas granulares de granulometría abierta. Estos geosintéticos pueden ser de distintos tipos ofreciendo diferentes grados de refuerzo a la estructura del firme. Hanson-Formpave (2008) recoge la presencia obligada de al menos una geomalla de refuerzo en la subbase para aumentar su capacidad resistente.

Por último, en los firmes permeables con almacenamiento o drenaje diferido se emplean geomembranas para la impermeabilización del volumen correspondiente a la subbase. Estas láminas impermeables deben asegurar un total sellado de la explanada que permita contar con una subbase estanca, a modo de depósito para el almacenamiento del agua de lluvia infiltrada. Hanson-Formpave (2008) indica las especificaciones necesarias exigibles a las geomembranas empleadas en estos casos.

II.3 PROBLEMAS DE COLMATACIÓN

II.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Uno de los problemas de los pavimentos impermeables es el aumento de la permeabilidad con el paso del tiempo, permitiendo que la acción del agua degrade el firme (Dirección General de Carreteras, 1990; Hinojosa Cabrera, 2004; Parrilla Alcaide *et al.*, 2005). Por el contrario, el principal inconveniente de los pavimentos permeables es la colmatación y la consiguiente reducción de su capacidad de infiltración a lo largo del tiempo.

La colmatación, o bloqueo por acumulación de sedimentos arrastrados por el agua, se produce fundamentalmente en la interfase entre una capa permeable y otra capa menos permeable (Siriwardene *et al.*, 2005). Así, esta acumulación de sedimentos en las distintas capas puede reducir la funcionalidad del conjunto del firme permeable (Dierkes *et al.*, 2002; Pratt *et al.*, 2002; Scholz *et al.* 2007; Brattebo *et al.* 2003; Davies *et al.*, 2002). Legret *et al.* (1996) demostraron que la superficie es la zona más sensible a la colmatación. Posteriormente, con la introducción del uso de geotextiles en los firmes permeable, se comprobó que la colmatación, además de en la superficie del firme, se puede producir en los geotextiles de separación entre capas (Rommel *et al.*, 2001).

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 minerales de diversos tamaños procedentes fundamentalmente de los vehículos.
- Partículas colmatantes secundarias: sedimentos más finos compuestos por arcilla, materia orgánica, basura, etc., que cambian su comportamiento en presencia de agua.

Los repetidos ciclos humedad-sequedad hacen que los colmatantes secundarios actúen como un ligante de los primarios, haciendo disminuir la permeabilidad a lo largo del tiempo y dificultando la limpieza al aumentar la cohesión de los sedimentos. Por tanto, Legret (2001) recomienda la limpieza regular con carácter preventivo, de manera que se evite este efecto.

Respecto a la cantidad de sedimentos presente en el viario urbano, Davies *et al.* (2002) recogieron 440 g en 15 m² (0,029 kg/m²) de un pavimento de adoquines construido en 1989, barrido periódicamente. Además, estos autores citan a Pratt y Adams (1981), que por su parte

recogieron 7096 g en un área de 213 m² a lo largo de un año (0,033 kg/m²/año). Por tanto, no son válidas las correlaciones de cantidad de sedimento con el tiempo. La cantidad de sedimento presente en un pavimento permeable no sólo depende del tiempo, sino también del tipo de pavimento, su mantenimiento y las condiciones de aporte de partículas. Así, por ejemplo, Davies *et al.* (2002) utilizaron tres maneras diferentes de aplicación del sedimento para la simulación de la colmatación realizada en laboratorio:

- a) Rellenando los huecos del bloque en tres etapas de llenado y compactación ligera, con lavado durante varias horas.
- b) Rellenando los huecos del bloque en una única etapa de llenado y compactación energética.
- c) Rellenando los huecos del bloque con el método anterior, dejando el pavimento bajo un flujo de escorrentía superficial durante varias horas, retirando posteriormente los 30 mm superiores de sedimento.

La cantidad utilizada por Davies *et al.* (2002) para colmatar la muestra de 0,25 m² de adoquines con ranuras fue de 540 g (2,16 kg/m²) con el método de aplicación (a) y 625 g (2,50 kg/m²) con el método (b). Además, se observó que la capacidad de infiltración al añadir sedimento con el método (b), en una única etapa de llenado y compactación, fue significativamente menor que aplicando los otros dos métodos: (a) y (c).

Por otro lado, en Suecia, se comprobó que el riesgo de colmatación y bloqueo de la superficie es muy alto mientras existan obras de construcción próximas al emplazamiento (Hogland *et al.*, 1987). Además, según Schlüter y Jefferies (2005), la escorrentía procedente de zonas en obra es la que más afecta a la vida útil de los sistemas de infiltración.

Por su parte, el MOPU (1987) señalaba que en las obras realizadas hasta entonces con mezcla bituminosa porosa se observaba como el efecto de colmatación natural se veía contrarrestado por el efecto de limpieza de las fuerzas de succión de los neumáticos. Respecto al tema de la colmatación de superficies de mezcla bituminosa porosa, del Val Melús (1990) realiza las siguientes observaciones:

- El paso de los neumáticos produce una succión efectiva que ralentiza la colmatación en las zonas de rodada.
- Cuanto mayor sea el índice de huecos inicial, mayor será la vida útil.
- Se debe evitar la utilización de capas porosas en zonas sin tráfico ni mantenimiento donde se acumularía la suciedad.
- Una limpieza cada 4 o 5 años con aspiradores autopropulsados sería suficiente para mantener las propiedades drenantes de una capa de mezcla bituminosa porosa.

Pérez Jiménez y Calzada Pérez (1990) coinciden también en que el efecto de colmatación natural de las mezclas drenantes se ve contrarrestado por la acción de succión realizada por los neumáticos. Mientras, Membrillo Medrano (1995) puntualiza algunas afirmaciones acerca del bloqueo de las mezclas bituminosas porosas:

- La colmatación es diferencial siendo la permeabilidad mayor en las zonas de rodadura debido al efecto succión de los neumáticos.
- La colmatación es más lenta cuanto mayor es la porosidad de la mezcla y la intercomunicación de los huecos.
- En las zonas sin tráfico, la colmatación es rápida pero meramente superficial, siendo sencilla su limpieza.

El seguimiento durante quince meses de los cambios de permeabilidad en seis tramos de carretera, tres con alta velocidad de tráfico y tres con baja velocidad, permitió constatar como la mayor velocidad del tráfico ayuda a mantener mejores permeabilidades a lo largo del tiempo, gracias al efecto succión. Así, en vías urbanas con bajas velocidades de circulación, se observa una importante pérdida de permeabilidad que tiene lugar durante los diez primeros meses de uso (IDI, 2003)

Colwill (1997) resalta la rápida colmatación que se produce en zonas frías, debida al uso de sales contra la formación del hielo, y señala que, a la hora de asegurar una rápida circulación del agua, es más importante el tamaño de los huecos que el número de los mismos. Por tanto, recomienda utilizar el tamaño máximo más grande posible. González Bolívar (1997) está de acuerdo en que la colmatación es más lenta partiendo de porcentajes de huecos más altos, si bien puntualiza que la diferencia no es muy significativa.

En cualquier caso, la colmatación puede ser prevenida y reducida mediante la limpieza periódica con barrido y aspiración o lavado con agua a presión (Pratt *et al.*, 2002; Davies *et al.*, 2002; Dierkes *et al.*, 2002). Así, por ejemplo, Dierkes *et al.* (2002) fueron capaces de recuperar la capacidad de infiltración de un pavimento de losas porosas con 15 años de antigüedad mediante barrido y aspiración, pasando de valores de $0,01 \cdot 10^{-2}$ cm/s a valores de capacidad de infiltración entre $15,45 \cdot 10^{-2}$ cm/s y $52,76 \cdot 10^{-2}$ cm/s tras la limpieza. Además, para limitar la penetración de los sedimentos y mejorar los rendimientos de limpieza, proponen un adoquín de hormigón poroso bicapa. En esta línea, Bendtsen *et al.* (2005) están probando tres tipos de superficies bicapa constituidas por mezclas bituminosas porosas, con el objetivo de resolver los problemas de colmatación que limitaban la vida útil de las capas drenantes a dos años en Dinamarca. En ambos casos, la capa superior de la superficie bicapa es más cerrada, actuando como filtro de partículas y manteniendo la mayor permeabilidad de la capa inferior.

II.3.2 ANÁLISIS EN LABORATORIO

El análisis en laboratorio de la funcionalidad de los firmes permeables se realiza fundamentalmente mediante permeámetros, infiltrómetros o lisímetros.

Pérez Jiménez *et al.* (1985) realizaron un estudio en laboratorio de las características de las mezclas bituminosas porosas, analizando la permeabilidad con un permeámetro de carga variable. La principal conclusión de este estudio referida a la permeabilidad fue que las mezclas con igual porcentaje de huecos tienen similares permeabilidades, independientemente de la granulometría de los áridos. También Tan *et al.* (2000) utilizan para sus ensayos de evolución de la permeabilidad frente a la colmatación de mezcla bituminosa porosa un permeámetro de carga variable. Este permeámetro, de 150 mm de diámetro, es apoyado en el centro de una probeta cuadrada de 500 mm de lado con espesores variables de 50, 75 y 100 mm. A continuación, vierten sobre él veinte litros de agua para asegurar la penetración del sedimento (2 kg/m^2 de suelo residual de Singapur) en el espesor de la probeta. Parte del sedimento fue arrastrado a través del pavimento, siendo medido mediante un filtrado del efluente. Del análisis de los resultados se extrae que la fórmula de Giroud para colmatación de geotextiles puede llegar a ser aplicable también a capas de mezcla bituminosa porosa, resultando especialmente ajustada para espesores de 75 mm.

Por su parte, Xu *et al.* (2004) utilizan un permeámetro de carga constante para analizar en laboratorio la permeabilidad de las mezclas porosas. Tras ensayar combinaciones de diversas granulometrías y betunes, concluyen que la permeabilidad depende fundamentalmente de los huecos y no del tipo de árido o betún empleados, siendo determinante el porcentaje de árido que pasa por el tamiz N° 8 ASTM (2,36 mm).

Además de permeámetros, se han utilizado numerosos infiltrómetros con simulación de lluvia para el estudio en laboratorio de la capacidad de infiltración de pavimentos permeables (Johnston *et al.*, 1984; Davies *et al.*, 2002; Castro *et al.*, 2006), aunque fundamentalmente se emplean para el estudio de los procesos de erosión (Pla Sentis, 1981; Ogunye y Boussabaine, 2002; Lei *et al.*, 2006). Cabe destacar el análisis experimental de pavimentos permeables llevado a cabo en laboratorio por Shackel (1997). En este análisis se utiliza una muestra cuadrada de 1,5 m de lado, compuesta por adoquines con ranuras, rellenas o libres, sobre 30 mm de cama de asiento. Como simulador de lluvia se emplea una línea de aspersores sobre una rejilla de reparto, controlando la intensidad mediante una válvula y un medidor de caudal. Los resultados de este estudio indican que, mientras una arena gruesa sin finos asegura una buena infiltración, una arena convencional, utilizada normalmente para sellar superficies de adoquines, reduce un 50% la capacidad de infiltración, haciendo que el uso de adoquines

específicos para pavimentos permeables no tenga sentido.

Destacan además los estudios realizados en la Universidad de South Australia (Rommel *et al.*, 2001) y en la Universidad de Coventry (Davies *et al.*, 2002), ambos con superficies de adoquines con ranuras de la empresa Hanson-Formpave. Esta empresa del Reino Unido es pionera en el desarrollo de adoquines para pavimentos permeables como el Aquaflow, empleado en estas experiencias. Las dimensiones de este adoquín son 200 mm x 100 mm x 80 mm, contando con estrías rectangulares de 40 mm x 4 mm en los lados cortos y un chaflán superior de 1,5 mm (Hanson-Formpave, 2008). En la Universidad de South Australia se emplean dos áreas de 0,45 m por 0,33 m (0,145 m²) de este tipo de adoquines, sobre una cama de 50 mm de gravilla y el geotextil de separación, contando además con la capa subbase de 280 mm de grava y otra capa de geotextil en el fondo (Rommel *et al.*, 2001).

Por su parte, en la Universidad de Coventry utilizaron una instalación experimental que proporcionaba un caudal de escorrentía a una muestra cuadrada de 500 mm de lado (0,25 m²). El pavimento ensayado estaba formado por adoquines Aquaflow sobre una capa de 50 mm de gravilla y una lámina de geotextil. La instalación permitió estudiar la capacidad de infiltración con distintas inclinaciones del pavimento: 1%, 3%, 5% y 10%. El agua infiltrada a través de la muestra percolaba a un grupo de cinco cámaras de 100 mm de ancho colocadas en la parte inferior. El agua que no era infiltrada era recogida como escorrentía residual en una sexta cámara situada al final de la muestra. El caudal de escorrentía empleado fue el equivalente a una precipitación de intensidad 50 mm/h sobre una superficie de 0,25 m². El experimento tenía una duración de veinte minutos para cada inclinación. En las pruebas en las que no se añadió sedimento a la superficie la mayor parte del volumen infiltrado se acumuló en las dos primeras cámaras de recogida, las más cercanas a la fuente de escorrentía. En estas circunstancias el pavimento no produjo escorrentía residual, ni siquiera para la pendiente del 10%. Con aportación de sedimento se observó una reducción significativa de la capacidad de infiltración del pavimento, si bien se lograba una cierta recuperación cuando se limpiaban los 30 mm superiores del sedimento (Davies *et al.*, 2002).

En Alemania, Fach *et al.* (2002) utilizaron también un infiltrómetro con simulación de lluvia en laboratorio para medir cantidad y calidad del efluente de dos tipos de pavimento permeable. El simulador de lluvia empleado permitía la variación de la intensidad de la lluvia. La medición del caudal efluente de la sección permeable se realizaba con un caudalímetro de inducción. La principal conclusión extraída de este estudio fue que los adoquines de hormigón poroso permiten una mejor retención de los contaminantes que los adoquines con ranuras. Dierkes *et al.* (2005) utilizan una metodología similar y demuestran que una relación 16/1 de superficie impermeable/permeable no permite un correcto funcionamiento hidráulico de un pavimento permeable. Como conclusión estos autores recomiendan un estricto estudio

hidráulico para relaciones mayores de 2/1.

Por su parte, Valavala *et al.* (2006) ensayan adoquines de hormigón poroso con porcentaje de huecos entre el 16% y el 27%. En estos ensayos se varía la pendiente de la superficie, entre el 2% y el 10%, y el tipo de arena sobre la que se asientan los adoquines. La simulación de lluvia se realiza mediante una tubería perforada en la parte alta de la superficie a ensayar. Se comprobó que la escorrentía residual al final de la superficie sólo se producía con volúmenes de aportación muy altos. Las principales conclusiones extraídas de este estudio son el aumento de la escorrentía con la inclinación, la limitación que puede llegar a suponer la permeabilidad de la base y la escasa generación de escorrentía con este tipo de pavimento.

Además de permeámetros e infiltrómetros, en la investigación sobre firmes permeables se han empleado recipientes especiales para la evaluación de volúmenes de agua o lisímetros. Estos recipientes permiten el análisis hidrológico detallado de secciones permeables completas, no únicamente de los pavimentos. Así, en la Universidad de Coventry, Bond y Pratt (1998) y posteriormente Newman *et al.* (2003), han utilizado cubos de plástico, con la estructura completa del firme permeable en su interior, para analizar la calidad del agua efluente tras simular un vertido de hidrocarburos seguido de una lluvia de lavado.

En Francia, Ramier *et al.* (2004) estudiaron tres tipos de pavimentos durante cinco meses utilizando lisímetros que permitían la medición de la escorrentía superficial, la infiltración y la evaporación que tenían lugar. Dos de las superficies ensayadas eran impermeables, resultando una escorrentía superficial del 70% de la precipitación. Mientras, la tercera superficie ensayada, que era permeable, presentó tan sólo un 16% de escorrentía. Las pérdidas por evaporación fueron de un 25% en todos los casos. Respecto a la infiltración, esta fue de un 58% en el caso de la superficie permeable y de un 3% de las superficies impermeables. Además, se observó cierta independencia respecto a las precipitaciones previas en el caso del pavimento permeable, mientras que el comportamiento de las superficies impermeables se veía fuertemente condicionado por los antecedentes de lluvia.

En esta línea, recientemente Coupe *et al.* (2006) han utilizado barriles sin desagüe de fondo para medir la variación a lo largo del tiempo de la cantidad de agua almacenada en la subbase de un firme permeable de adoquines con ranuras. En este estudio se compara la influencia del tipo de geosintético utilizado entre base y subbase a la hora de limitar la pérdida por evaporación en los periodos de sequía. Los resultados muestran como la combinación de geotextil y geomembrana limita las pérdidas por evaporación en el interior del firme.

II.3.3 ANÁLISIS EN CAMPO

La construcción de pavimentos permeables genera la necesidad de realizar un seguimiento a lo largo del tiempo de la evolución de la capacidad de infiltración medida en campo. Esta medición periódica se puede realizar mediante permeámetros o infiltrómetros portátiles.

Los aparatos más empleados para el análisis in situ de la capacidad de infiltración de suelos son los infiltrómetros de disco de tensión y de anillo de presión (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000). Sin embargo, para mediciones en pavimentos permeables, se tiende a utilizar infiltrómetros o permeámetros más sencillos que pueden ser clasificados en dos categorías:

- De inundación o de anillo: evalúan la respuesta de la superficie ante una columna de agua de altura variable o constante.
- Con simulación de lluvia: evalúan la respuesta de la superficie ante distintos tipos de simulaciones de lluvia sobre el área de ensayo.

Entre los infiltrómetros de inundación, los más usados emplean un tubo con una columna de agua variable en su interior. Ejemplos de estos aparatos son el permeámetro LCS (Laboratorio de Caminos de Santander) descrito en la norma española NLT-327/00 (2000), o el permeámetro de anillo descrito en la norma europea EN 12697-40 (2005) y en su correspondiente transposición a la norma española UNE-EN 12697-40 (2006). Otro ejemplo de permeámetro portátil de carga variable es el permeámetro NUS empleado por Tan (2002) para estudiar la evolución de la colmatación en mezclas bituminosas porosas mediante ensayos de campo en diferentes localizaciones de Singapur. La evaluación de la capacidad de drenabilidad o de infiltración con estos aparatos es fácil, rápida y barata. Estos permeámetros descargan un volumen de agua sobre un punto de la superficie a través de un pequeño agujero en su parte inferior. La medición que se realiza es el tiempo que tarda el nivel del agua en el interior del tubo en descender entre dos marcas fijas.

El principal inconveniente de estos aparatos es que los resultados dependen en gran medida de las condiciones del punto del pavimento ensayado: presencia de grietas, fisuras, material suelto, humedad y temperatura (Gerke, 1984). Además, la capacidad de infiltración medida incluye la componente de permeabilidad horizontal de la capa superficial por lo que la medida es de drenabilidad total (Calzada Pérez, 1984). El infiltrómetro de doble anillo (ASTM D 3385-03, 2003), empleado tanto en suelos como en pavimentos permeables, intenta corregir estos problemas ensayando un área mayor y fijando las condiciones de contorno para minimizar la influencia de la permeabilidad horizontal, al menos en el anillo interior (Touma y Albergel, 1992). Sin embargo, este ensayo puede dar mayores valores de infiltración que el

resto, debido a que la altura de agua sobre la superficie se mantiene constante durante el periodo de observación. Además, ninguna de estas metodologías cuenta con el efecto del impacto de las gotas de lluvia (Bhardwaj y Singh, 1992).

En Estados Unidos, Bean *et al.* (2004) emplearon el infiltrómetro de doble anillo para estudiar los índices de infiltración de dos tipos de pavimento permeable, analizando el efecto del mantenimiento en varios emplazamientos. El doble anillo estaba formado por un anillo interior de diámetro entre 280 mm y 305 mm, y uno exterior de diámetro entre 760 mm y 910 mm, aproximadamente el triple del interior. Los dos pavimentos permeables estudiados fueron adoquines con ranuras y grava con refuerzos de hormigón. Mediante un análisis fotográfico previo se comprobó que el porcentaje de área drenante era de un 9% para el primer caso y de un 30% para el segundo. Las ranuras de los adoquines estaban rellenas con arena sin finos y el árido drenante reforzado con los prefabricados de hormigón tenía la granulometría recogida en la Tabla II-2.

Tabla II-2. Granulometría de relleno drenante n° 78 recogida en la norma ASTM D448-03a (2003).

Granulometría a del árido	Abertura de tamiz (mm) y porcentaje en masa del árido que pasa por los tamices (% pasa)					
	19,0 (3/4 pulgada)	12,5 (1/2 pulgada)	9,5 (3/8 pulgada)	4,75 (No. 4)	2,36 (No. 8)	1,18 (No. 16)
N° 78	100	90-100	40-75	5-25	0-10	0-5

Bean *et al.* (2004) seleccionaron al azar catorce localizaciones para llevar a cabo las pruebas sin mantenimiento y con mantenimiento. El mantenimiento se simuló mediante la limpieza de la superficie hasta una profundidad de 13 a 19 mm, acción similar a la realizada por un camión cisterna aspirante o por una máquina barredora de calles. Los resultados mostraron que, de media, la simulación del mantenimiento aumentó los índices de infiltración. La mayor parte de las localizaciones de adoquines presentaron tasas de infiltración extremadamente altas salvo uno de los emplazamientos donde se aplicó el procedimiento de mantenimiento y el índice de infiltración aumentó de 80 mm/h a 225 mm/h. Por su parte, los pavimentos de grava reforzada sin mantenimiento presentaban índices de 71 mm/h y 50 mm/h, que aumentaron con la simulación del mantenimiento hasta 118 mm/h y 80 mm/h respectivamente. Se concluyó que las superficies de adoquines con ranuras rellenas con arena gruesa ofrecían una capacidad de infiltración superficial más alta, siempre que no se viese disminuida por la acumulación de sedimentos. Respecto al mantenimiento, una limpieza anual hasta una profundidad de 13 mm, con un relleno posteriormente con material drenante nuevo, parece ser suficiente para mantener las tasas de infiltración en niveles apropiados.

Posteriormente, Bean *et al.* (2007) completaron las investigaciones anteriores

realizando ensayos de infiltración en cuarenta pavimentos permeables en los estados de Carolina del Norte, Maryland, Virginia y Delaware, antes y después de un mantenimiento simulado mediante la retirada de los 13 a 19 mm superiores de sedimento acumulado en los canales de infiltración de los pavimentos permeables. Así, la grava reforzada con prefabricados de hormigón (15 emplazamientos) mostró una tasa de infiltración de 49 mm/h antes de la simulación de mantenimiento y 86 mm/h después. Los pavimentos permeables de adoquines con ranuras (14 emplazamientos) presentaron infiltraciones de 800 mm/h antes de la limpieza y 20000 mm/h después. Por último, los adoquines de hormigón poroso (11 emplazamientos) ofrecieron infiltraciones de 130 mm/h antes del mantenimiento y 40000 mm/h después. La principal conclusión de este estudio es la importancia crítica que tiene el mantenimiento regular para asegurar unas tasas de infiltración altas en los pavimentos permeables.

Respecto a los infiltrómetros o permeámetros portátiles con simulación de lluvia, han sido propuestos varios de mayor o menor complejidad, tanto para el estudio de suelos como de pavimentos permeables (Gerke, 1982; Bhardwaj y Singh, 1992; Hudson, 1997; Ogden, 1997; Dierkes *et al.*, 2002; de Solminihac y Castro, 2002; Borgwardt, 2006). Un ejemplo de infiltrómetro portátil con simulador de lluvia es el permeámetro de Zarauz. La simulación de lluvia empleada en este caso consiste en el vertido directo desde una cierta altura de un volumen conocido de agua, observando la posterior infiltración (de Solminihac y Castro, 2002). Sin embargo, este tipo de simulación no representa el efecto del impacto de las gotas de agua, una de las principales características de la lluvia.

El efecto de las gotas de agua tiene gran importancia en los procesos de erosión y, además, se ha probado que afecta al proceso de infiltración (Bhardwaj y Singh, 1992). Otro aspecto importante relacionado con la simulación de lluvia es el ajuste de la intensidad de ensayo. Permitir la posibilidad de ensayar diferentes intensidades puede servir para caracterizar los límites reales de un pavimento permeable. Tanto la representación del efecto de las gotas como la variación de la intensidad son posibles utilizando infiltrómetros portátiles con simulación de lluvia mediante goteo (Shackel, 1997). Por último, hay que tener en cuenta que para aumentar la calidad de las medidas conviene ensayar un área lo más amplia posible fijando estrictamente las condiciones de impermeabilización lateral (Membrillo Medrano, 1995).

Por último, comentar que también es posible evaluar el estado de un firme permeable mediante comparación visual cualitativa respecto a una superficie de control impermeable adyacente (Brattebo y Booth, 2003).

II.4 PROBLEMAS DE DEGRADACIÓN

II.4.1 ACCIÓN DEL AGUA

La base de la pavimentación ecológica es fomentar la infiltración del agua a través de las estructuras de los firmes permeables (Shackel, 1997). Por tanto, hay que seleccionar adecuadamente los materiales empleados para minimizar los efectos del agua.

La acción del agua sobre los firmes puede producir la pérdida de capacidad soporte debido al debilitamiento de la estructura, los movimientos del terreno de apoyo o la erosión de taludes y cimientos (Hinojosa Cabrera, 2004; Parrilla Alcaide *et al.*, 2005). Para minimizar estos efectos hay que evacuar el agua de lluvia y la escorrentía superficial de los firmes cuanto antes mediante los sistemas de drenaje necesarios (Hinojosa Cabrera, 2004). Para lograr este objetivo se cuenta actualmente en España con la Instrucción 5.2-IC Drenaje Superficial de la Dirección General de Carreteras (1990) y las Recomendaciones para el Proyecto y Construcción del Drenaje Subterráneo de Obras de Carreteras, Orden Circular del Ministerio de Fomento (2003).

El agua afecta fundamentalmente a las capas inferiores del firme. En un firme, el agua presenta un flujo vertical hasta encontrar una capa de baja permeabilidad sobre la que se produce un flujo horizontal. Así, si todas las capas fuesen suficientemente permeables, el flujo vertical las atravesaría hasta encontrar un material más impermeable en profundidad, incluso por debajo de la explanada (Parrilla Alcaide *et al.*, 2005). Tradicionalmente, se usaron capas granulares de áridos rodados para drenar el agua procedente de infiltraciones verticales o laterales. Sin embargo, con la práctica, estas capas resultaron ser impermeables, presentando un alto contenido de finos (Kraemer *et al.*, 2004). Actualmente, los rellenos localizados de material drenante deben cumplir el artículo 421 del PG-3 (2007), lo cual implica que estén libres de arcillas, margas y otros materiales extraños, ya procedan de graveras o de canteras. Como base y subbase, la opción permeable más barata y resistente son las zahorras drenantes. En España, los principales estudios sobre las zahorras artificiales drenantes fueron realizados por la Universidad Politécnica de Madrid durante la década de los ochenta (del Val Melús, 1990). Con estos estudios se comprobó que estas capas granulares permiten obtener capacidades de soporte similares a las obtenidas con granulometrías continuas cerradas gracias a la abundancia de caras de fractura. Por tanto, su empleo podría llegar a minimizar los problemas de los firmes frente a la acción del agua. Sin embargo, estas zahorras drenantes sin finos no permiten un grado de compactación elevado por lo que su adecuada puesta en obra presenta serias dificultades (Kraemer *et al.*, 2004).

La transmisión de cargas que ofrecen las capas granulares drenantes puede no ser adecuada si no se cuida la continuidad de su granulometría para permitir una adecuada compactación. Para mejorar la compactabilidad, se puede llegar a aumentar el contenido de finos de un relleno drenante, con el efecto añadido de la disminución de su permeabilidad. Además, este incremento de finos debe realizarse siempre considerando la afección de los ciclos humedad sequedad y el posible arrastre de partículas debido al paso del agua, efectos que disminuyen la capacidad portante de la correspondiente capa con el paso del tiempo. Por tanto, hay que llegar a soluciones de compromiso evitando casos como los producidos en Alemania. En este país se recomienda el uso de zehorras continuas, aún en firmes permeables, para cumplir con los requerimientos de compacidad, asumiendo la pérdida de permeabilidad e incluso la pérdida de capacidad portante del firme permeables con el paso del tiempo (Dierkes *et al.*, 2005).

Además, la posible afección del agua se intensifica con la inclinación, de manera que si se construye un firme permeable sobre pendientes pronunciadas, el escurrimiento del agua sobre la capa de menor permeabilidad puede llegar a causar subpresiones que dañen el firme (MINVU, 1996). Para evitar este efecto, Hanson-Formpave (2008) propone la disposición cada diez metros de represas de 200 mm de altura en el fondo de la subbase, con desagües que aseguren el recorrido lento en zigzag de las posibles corrientes de agua.

En cualquier caso, siempre es posible plantear refuerzos estructurales que aseguren la correcta capacidad portante del firme permeable. Estos refuerzos pueden consistir en el empleo de geomallas (Hanson-Formpave, 2008) o de estabilizaciones con cualquier tipo de ligante o conglomerante, como por ejemplo cemento. Así, McBride y Knapton (2006) plantean un refuerzo de la sección que permite a los pavimentos permeables de adoquines resistir incluso tráfico pesados en zonas comerciales. Este refuerzo consiste en añadir cemento en los 200 mm superiores del árido grueso que forma la subbase del firme. Esto supone la creación de una capa de hormigón poroso pobre que, aún reduciendo el porcentaje de huecos de la subbase del 32% al 25%, mantiene una permeabilidad adecuada y aporta una resistencia añadida. Además, basándose en la experiencia de construcción de aparcamientos y vías de acceso en cincuenta zonas comerciales de Irlanda, demuestran que la utilización de firmes permeables con este tipo de refuerzos resulta económicamente rentable. En esta línea, Aguado (1995) señala diversos ejemplos de uso de hormigones porosos como base y subbase de firmes permeables en Francia o Estados Unidos con dotaciones de 170 a 200 kg/m³ de cemento y espesores de 10 a 15 cm. Por último, Alegre y Xarles (1996) recomiendan el uso de hormigones porosos como bases y subbases, bajo superficies menos permeables que actúen a modo de filtro y sean más sencillas de mantener y reponer en caso necesario.

II.4.2 ESFUERZOS TANGENCIALES

Una de las características estructurales fundamentales de la capa de rodadura de cualquier firme debe ser una adecuada resistencia a los esfuerzos tangenciales originados principalmente por el frenado, la aceleración y la maniobra de los vehículos. Este tipo de solicitaciones son de gran importancia en zonas urbanas, fundamentalmente en áreas de estacionamiento y paradas de autobuses (del Val Melús, 1990).

Dentro de los firmes permeables, los pavimentos que ofrecen una mayor resistencia a este tipo de esfuerzos son los de mezcla bituminosa porosa y adoquines. En el caso de mezclas bituminosas, los esfuerzos tangenciales afectan fundamentalmente a los aglomerados porosos produciendo su desgaste superficial. Así, para asegurar el correcto diseño y resistencia a la degradación de las mezclas bituminosas porosas, se emplea el ensayo cántabro de pérdida por desgaste. Este ensayo fue desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad de Cantabria (Pérez Jiménez *et al.*, 1982; MOPU, 1987) y está normalizado en la NLT-352/00 (2000). Pérez Jiménez *et al.* (1985) realizaron un análisis de las mezclas bituminosas porosas cuyas principales conclusiones fueron:

- La pérdida por desgaste depende fundamentalmente del porcentaje de huecos, el contenido de filler y el porcentaje de betún, no influyendo de una manera importante la granulometría de los áridos.
- La fabricación de mezclas permeables con un porcentaje de huecos por encima del 20% y una resistencia a la abrasión adecuada requiere un contenido de betún mayor o igual al 4,5% y un porcentaje de filler del orden del 4%.

Posteriormente, Pérez y Calzada (1990) recogen la experiencia española en mezclas bituminosas porosas durante la década de 1980, señalando que después de ocho años de uso, el deterioro superficial de estas no es mayor que el observado en mezclas densas o semidensas sometidas al mismo tráfico. Según del Val Melús (1990), el enfoque de la instrucción 6.1 y 2 IC respecto a la resistencia mecánica de las mezclas drenantes y sus limitaciones de uso no es correcto. Este autor opina que la utilización de mezclas bituminosas porosas en superficie no debe condicionarse desde el punto de vista estructural, dado que, mientras el resto del pavimento tenga la capacidad portante necesaria, la función de la capa de rodadura es puramente la de transmisión de cargas. Gómez Saiz (1997) señala que las mezclas drenantes fabricadas con ligantes modificados son menos rígidas y menos frágiles a temperatura ambiente (25°C) que las fabricadas con ligantes convencionales. Además, los ligantes modificados presentan mejor resistencia frente a la disgregación (ensayo cántabro) con una menor susceptibilidad térmica. Además, las mezclas drenantes con ligantes modificados

siguen siendo más resistentes tras la acción del agua que las mezclas fabricadas con ligantes sin modificar, aún perdiendo relativamente mayor resistencia al desgaste respecto a los ensayos en seco. En los últimos años, en China, Xu *et al.* (2005) han utilizado el ensayo cántabro de desgaste para comparar dos tipos de granulometrías y cuatro dosificaciones de betún obteniendo desgastes que iban desde el 3% hasta el 25%. Concluyen que el empleo de betunes con alta viscosidad combinados con una granulometría adecuada asegura una buena durabilidad de las mezclas porosas, presentando buenos valores de estabilidad mecánica, comportamiento hidráulico y resistencia a la fractura a bajas temperaturas.

En el caso de pavimentos de adoquines, las cargas dinámicas originadas por los vehículos en movimiento actúan simultáneamente en dos direcciones (Euroadoquín, 2004):

- Vertical: esfuerzos que se transmiten directamente a las capas inferiores del firme.
- Horizontal: esfuerzos tangenciales que producen un movimiento de rotación en el adoquín transmitiéndose lateralmente a los adoquines contiguos.

Euroadoquín (2004) indica que para aumentar la estabilidad de la superficie de adoquines es preciso colocarlos en una cierta disposición respecto a la dirección del tráfico. La trabazón óptima se logra con una disposición de los adoquines a 90° en diagonal respecto a la dirección del tráfico. De esta manera los esfuerzos horizontales se minimizan repartiéndose entre las cuatro caras de los adoquines. Respecto al espesor de los adoquines, Euroadoquín (2004) recomienda un espesor nominal mínimo de 80 mm, dado que cuanto mayor sea el espesor del adoquín, más estable y duradero será el pavimento sometido al tráfico rodado. Esto se debe a que un mayor espesor supone mayor superficie de contacto lateral y una menor concentración de esfuerzos. Así, con un espesor adecuado, se puede evitar la degradación de las esquinas de los adoquines. Además, se recomienda completar el relleno de las juntas con arena de río bien lavada y contar con unos adecuados bordes de confinamiento para asegurar la correcta transmisión de cargas a través de los contactos laterales entre adoquines.

En el caso de los adoquines con ranuras rellenas de material drenante, no es posible obtener una buena resistencia a los esfuerzos tangenciales si se usan separadores y huecos vacíos, debido a que la transmisión de las cargas se realiza únicamente a través de los separadores. Según Shackel (1997), la mejor combinación de capacidad de infiltración y capacidad portante se obtiene con rellenos de arenas de 2 a 4 ó 5 mm, ofreciendo resistencia suficiente para su uso incluso en calzadas con tráfico pesado. En los pavimentos permeables de adoquines con ranuras libres no se utiliza relleno para las ranuras, por lo que los problemas asociados al material de relleno desaparecen, pero se debe asegurar una superficie de contacto lateral suficiente para la transmisión de los esfuerzos.

II.4.3 ACCIÓN DE LOS VERTIDOS

Los vertidos que pueden afectar a los pavimentos permeables haciéndoles más susceptibles a la acción de desgaste debida a los esfuerzos tangenciales son fundamentalmente dos: hidrocarburos y sales contra las heladas. Dado el ámbito de aplicación de los firmes permeables que se ha considerado, fundamentalmente vías urbanas de tráfico ligero y aparcamientos, el uso de sales contra las heladas puede considerarse esporádico, mientras que los vertidos de hidrocarburos procedentes de los vehículos suponen un riesgo frecuente.

Los pavimentos asfálticos en general presentan una escasa resistencia ante el derrame de combustibles y lubricantes, condicionando su aplicación en estaciones de servicio, hangares, garajes, aparcamientos y otras zonas con alto riesgo de vertido (Pérez Jiménez *et al.*, 1982; Tomás Raz, 1993). Los betunes empleados en pavimentación son de origen petrolífero por lo que son atacados y disueltos por aceites y carburantes que pertenecen a la misma familia química (Tomás Raz, 1993; Páez Dueñas, 2005). Buscando ligantes anticarburantes, McBee y Sullivan (1977) evaluaron la resistencia del asfalto con azufre a la acción disolvente de la gasolina, el gasóleo y el keroseno, encontrando que al aumentar el contenido de azufre se mejoraba la resistencia al ataque de los combustibles. Dada la falta de pruebas normalizadas, desarrollaron dos tipos de ensayos para comparar el ataque a distintos tipos de ligantes: inmersión en combustible durante ocho horas y goteo sobre la probeta de 600 ml de combustible. La técnica de inmersión pretendía simular un vertido masivo de combustible sobre un pavimento impermeable, mientras que la técnica de goteo representaba el derrame más común en zonas de estacionamiento. En ambos ensayos se evaluaron la pérdida de masa y de estabilidad de tres probetas Marshall para cada supuesto.

Otra solución posible para resistir el ataque de los hidrocarburos era sustituir el betún por alquitrán de hulla, de naturaleza química distinta a los combustibles y lubricantes y, por tanto, resistente a los posibles vertidos de los vehículos. Sin embargo, en la década de 1990 se descubrió que el alquitrán tenía carácter cancerígeno, siendo además cuestionada su durabilidad debido a su susceptibilidad térmica y a la aparición de grietas (Páez Dueñas, 2005; Corun *et al.*, 2006). Tomás Raz (1993), por su parte, destaca otras dos opciones para la construcción de pavimentos anticarburantes:

- Aglomerados semirrígidos de betún-cemento: mezcla asfáltica porosa con una lechada de cemento rellenando los huecos y protegiendo la superficie.
- Morteros o revestimientos autonivelantes de brea-epoxy: capas de hasta 35 mm de morteros, o de 5 mm de revestimientos autonivelantes, empleadas en puentes o paradas de autobuses, ofreciendo excelentes resultados.

En la misma línea, las principales empresas petroquímicas y constructoras comenzaron a trabajar en betunes anticarburantes obtenidos mediante adición de polímeros, cargas insolubles o reactivos químicos (Páez Dueñas, 2005). En 1995 la empresa holandesa Ooms Avenhorn Holding desarrolló un betún modificado con polímeros resistente a los vertidos de combustible (PMA JR) para su aplicación en el aeropuerto de Kuala Lumpur. Hasta la fecha, este betún ha sido aplicado con éxito en cinco aeropuertos en todo el mundo destacando el aeropuerto de La Guardia en Estados Unidos en 2002 (Corun *et al.*, 2006). Por otro lado, BP Bitumen desarrolló su propio betún resistente a los hidrocarburos, el FRB, aplicándolo en obras en el Reino Unido desde el año 2000: aeropuertos de Cambridge y Famborough, muelles de Cardiff, apartaderos de autopista en Northamptonshire, cocheras de autobuses, zonas de servicio y aparcamientos de camiones. Este producto se ha probado también en un aparcamiento de autobuses en Leganés, Madrid, en 2002, mostrando una correcta resistencia a los vertidos de hidrocarburos en las zonas de estacionamiento pero no en las de repostaje. Para el estudio en laboratorio de este betún se empleó el método de pérdida de masa por inmersión en gasóleo a 20 °C durante varios días. Con este método una mezcla bituminosa S12 fabricada con betún B 40/50 tiene una pérdida de masa del 18% al cabo de 28 días, mientras que la misma mezcla con betún FRB pierde tan sólo el 5% de masa (Cruz y Carswell, 2003).

De forma similar, Repsol YPF ha desarrollado, con las últimas tecnologías disponibles, el Betún Anticarburante BAC 35/50 que presenta un excelente comportamiento frente al ataque de los carburantes más utilizados. Su aplicación prioritaria se realiza en aquellas zonas en contacto frecuente con hidrocarburos: calles con mucho tráfico, zonas aeroportuarias, carriles bus, aparcamientos, zonas de estacionamiento prolongado de flotas de vehículos, peajes en autopistas, estaciones de servicio, garajes, etc. Tras veinticuatro horas de inmersión en gasoil, el betún BAC asegura una menor pérdida de masa que un betún B 40/50, conservando una mayor estabilidad Marshall. Además, los resultados del ensayo cántabro de desgaste realizado con mezclas densas y semidensas fabricadas con el BAC son del 4% antes de la inmersión en gasoil y del 8 al 11% tras la inmersión. Estos resultados son mejores que los obtenidos con las mismas mezclas con betún B 40/50: del 5 al 7% antes de la inmersión y del 16 al 19% después (Páez Dueñas, 2005). Posteriormente se han repetido estos ensayos obteniendo un desgaste en el ensayo cántabro después de 24 horas de inmersión en gasóleo del 13% con el BAC, frente al 21% y al 26% obtenidos con los betunes B 60/70 y B 40/50, respectivamente (Repsol YPF, 2007).

En los últimos años, algunos pliegos de especificaciones recogen una limitación a la variación de la masa de mezclas bituminosas densas o semidensas tras inmersión veinticuatro horas en gasoil o keroseno a temperatura ambiente. Sin embargo, ensayos como el cántabro de pérdida por desgaste o el de estabilidad Marshall, también reflejan los efectos de los vertidos

de hidrocarburos. Finalmente, cada laboratorio ha aplicado sus procedimientos de evaluación para evaluar dichos efectos. Las metodologías empleadas pueden ser clasificadas según Páez Dueñas (2005) en tres categorías:

- Inmersión y medición de la variación de la masa.
- Inmersión y medición de alguna propiedad mecánica.
- Inmersión, desgaste mecánico y medición de la variación de la masa.

Un ejemplo de la tercera categoría de ensayos es la metodología desarrollada por Buijs y van Buël en 2001 y empleada por Corun *et al.* (2006). Este ensayo consiste en someter únicamente una cara de la probeta a la inmersión en combustible durante veinticuatro ó setenta y dos horas, cepillándola posteriormente durante dos minutos con un cepillo de acero. Con este procedimiento, las pérdidas de masa totales fueron del 9,2% para betún de penetración 70/100, del 4,5% para betún modificado con polímeros y del 3,8% para el betún anticarburante (PMA JR) tras veinticuatro horas de semi-inmersión, y del 13,9%, 9,6% y 6,6%, respectivamente, tras setenta y dos horas de semi-inmersión (Corun *et al.*, 2006).

Con la intención de unificar criterios, recientemente ha entrado en vigor la norma UNE-EN 12697-43 (2006). Esta norma marca el siguiente procedimiento de ensayo para mezclas bituminosas cerradas:

- Inmersión de una cara de una probeta cilíndrica, hasta una altura de 35 mm, en disolvente a temperatura ambiente (18-25 °C) durante veinticuatro horas para betunes convencionales o setenta y dos horas en caso de tratarse de betunes modificados con polímeros.
- Limpieza y secado en horno ventilado a 25 °C durante veinticuatro horas.
- Medición de la pérdida de masa e inspección visual.
- Cepillado durante dos minutos (dos periodos de 30 s y uno de 60s)
- Medición de la pérdida de masa e inspección visual.

Esta norma fija la concentración de los disolventes en el 50% en agua, o en el 100% en caso de que el disolvente ensayado no sea miscible en agua. La resistencia a un disolvente específico se subdivide en tres categorías según la variación de masa tras la inmersión (A) y tras el cepillado (B) (UNE-EN 12697-43, 2006):

- Buena resistencia: $A \leq 5\%$ y $B < 1\%$.
- Resistencia moderada: $A \leq 5\%$ y $1\% \leq B \leq 5\%$
- Baja resistencia: $A > 5\%$ y $B > 5\%$.

Para asegurar la impermeabilidad y minimizar la penetración de los hidrocarburos, la

aplicación de betunes anticarburante requiere la reducción de los huecos en mezcla hasta un 3% o un 4%. Esta reducción en el porcentaje de huecos debe realizarse siempre comprobando que no se pone en riesgo la resistencia a las deformaciones plásticas del pavimento (Páez Dueñas, 2005). Por esta razón, ninguno de estos nuevos ligantes ni ensayos han sido aplicados al caso de mezclas bituminosas porosas. Sin embargo, sí existe la necesidad de la puesta a punto de métodos que permitan evaluar la resistencia a la acción de aceites y combustibles de este tipo de mezclas, de manera que su diseño no esté tan sólo supeditado a los resultados del ensayo cántabro de pérdida por desgaste (del Val Melús, 1990).

Con mezclas bituminosas porosas, Brule *et al.* (1993) realizaron ensayos con seis ligantes diferentes: dos ligantes convencionales de distinta penetración y cuatro ligantes modificados, variando el tipo y el contenido de aditivo. Los resultados del estudio muestran que el ensayo cántabro es muy sensible a la naturaleza del ligante, permitiendo la comparación entre los distintos tipos. De esta comparación se extrae como conclusión una clara mejora de las propiedades de las mezclas porosas debida a la adición de elastómeros al betún, especialmente del tipo EVA (etileno-vinilo-acetato), si bien se observa una reducción de los huecos de hasta un 2%. Con todo, se señala la necesidad de realizar un estudio específico para determinar la adecuación económica y técnica del ligante a cada tipo de aplicación. Por el contrario, Gómez Saiz (1997) señala que las características de las mezclas drenantes no guardan una clara relación con las propiedades de los ligantes empleados, siendo necesarios nuevos ensayos para evaluar los distintos materiales. Esta afirmación la sustenta en que los huecos en mezcla de las probetas fabricadas y ensayadas en laboratorio presentan una dispersión mayor de lo deseado, hecho que dificulta notablemente el análisis y la comparación de los resultados. Entre las causas más probables de esta dispersión se señalan la generalización de las características de los betunes (densidades y temperaturas de fabricación) y el método empleado para la medida de los huecos en mezcla (densidades geométricas). Tan *et al.* (2000) están de acuerdo con estas observaciones, afirmando que los resultados de los ensayos con mezclas bituminosas porosas son complicados de tratar debido a los diferentes porcentajes de huecos resultantes en las probetas.

Por último comentar que en el caso de pavimentos permeables de hormigón, discontinuos o continuos, la acción de los vertidos de hidrocarburos es despreciable, dado que no va más allá del mal efecto estético que causan las manchas superficiales. Para estos pavimentos serían los vertidos de sales para la prevención de heladas los que podrían llegar a afectar al cemento, reduciendo la resistencia de la superficie a los esfuerzos tangenciales, fundamentalmente en el caso del hormigón poroso donde la penetración sería mayor.

II.5 ELECCIÓN DE SECCIONES PERMEABLES

II.5.1 EXPERIENCIAS PREVIAS

Para la elección de las secciones permeables a ensayar se completó el estudio del estado del arte realizando un repaso de las experiencias previas en la construcción de áreas experimentales de firmes permeables. En Francia, en 1979 se realizaron estructuras de firmes permeables de dos capas: 6 cm de mezcla bituminosa porosa sobre 20 a 25 cm de hormigón poroso pobre (Aguado, 1995). Posteriormente, la ejecución de cuatro áreas experimentales de firmes permeables en el oeste y en el sur (zonas de Bordeaux y Nantes) permitieron a Raimbault *et al.* (1985) constatar los problemas que presentan este tipo de construcciones y plantear soluciones para futuras aplicaciones. Por su parte, Goacolou (1993) contó con los aparcamientos experimentales de Ambarès y Villeneuve en Gironde, mientras que Pagotto *et al.* (1999) compararon una superficie impermeable con otra permeable en una autopista francesa, demostrándose en todos los casos las mejoras hidráulicas y ambientales que suponen la laminación y depuración de la escorrentía superficial.

En Suecia, la Universidad de Lund realizó dos experiencias reales con una superficie total de 470 m² de aparcamientos construidos con la “Superestructura Unitaria” (Unit Superstructure). Este firme permeable está constituido por una superficie de mezcla bituminosa porosa (DRAINOR), sobre macadam de tamaños de 8 a 80 mm y de 60 a 200 mm, con una tubería drenante a modo de desagüe y una capa de geotextil de separación respecto a la explanada (Hogland *et al.*, 1987). En España, se construyó un tramo de firme permeable en 1989, en una calle de la urbanización de la Villa Olímpica de Barcelona. Si bien esta experiencia no tuvo continuación, del Val Melús (1990) presenta algunos ejemplos de secciones de “estructuras embalse” recogidos en la Tabla II-3.

Tabla II-3. Secciones de firmes permeables (del Val Melús, 1990).

Capa	Ejemplo 1	Ejemplo 2	Ejemplo 3
Rodadura	4 cm de mezcla bituminosa 0/12	4 cm de mezcla bituminosa 0/12	8 cm de hormigón poroso 0/12
Base	12 cm de macadam bituminoso 0/25	25 cm de hormigón poroso 0/20	32 cm de hormigón poroso 0/20
Subbase	20 cm de zahorra artificial drenante 0/25	20 cm de zahorra artificial drenante 0/25	–

En Alemania, cuatro tipos de firmes permeables, construidos en 1985, fueron investigados por Dierkes *et al.* (2002) durante 15 años, analizando la retención de contaminantes y concluyendo que no existe riesgo de contaminación del terreno en ningún caso. Los pavimentos permeables estudiados fueron adoquines con ranuras libres, adoquines de hormigón poroso en dos capas, césped reforzado con retícula de hormigón y adoquines con espacios entre ellos rellenos de césped.

En el Reino Unido, Pratt *et al.* (1989) ofrecen los detalles constructivos de cuatro secciones permeables aplicadas experimentalmente en el Clifton Campus of Trent Polytechnic, en Nottingham, en 1986. Este aparcamiento cuenta con diez y seis plazas en las que se combinan cuatro subbases con dos tipos de superficies de rodadura: adoquines y macadam poroso. Las dimensiones totales del aparcamiento experimental eran de 4,6 m de ancho y 40 m de largo, con una profundidad de 30 mm a 40 mm. Los áridos a comparar como subbase eran:

- Grava natural de 10 mm (granulometría en la que el 100% de las partículas pasa el tamiz 40 mm y menos del 35% el 0,5 mm).
- Escoria de alto horno de 40 mm (granulometría en la que el 100% de las partículas pasa el tamiz de 80 mm y menos del 20% el de 20 mm).
- Zahorra de granito de 5 a 40 mm (granulometría en la que el 100% de las partículas pasa el tamiz de 63 mm y menos del 32% el de 1 mm).
- Zahorra de caliza del carbonífero de 5 a 40 mm (granulometría en la que el 100% de las partículas pasa el tamiz de 63 mm y menos del 32% el de 1 mm).

Los primeros resultados de esta investigación permitieron comprobar una reducción del flujo de agua efluente, fundamentalmente en la sección con subbase de escoria de alto horno, seguramente debido a su textura tipo panal que permite la absorción de una mayor cantidad de agua. En laminación seguirían la caliza de cantera y el árido rodado, siendo el granito el que menos agua retiene. El caudal efluente supone un 30% de la intensidad pico de la precipitación. El tiempo de respuesta es de 5 a 10 minutos frente a los 2 ó 3 minutos de un pavimento impermeable. Posteriormente, el análisis de los resultados medidos en este aparcamiento experimental permitió extraer relaciones entre la lluvia y el caudal efluente, parámetros de almacenamiento y pérdida de agua, así como el desarrollo de modelos hidráulicos (Pratt *et al.*, 1995). Bond *et al.* (1999) continúan con la monitorización de este aparcamiento en Nottingham, constatando que las pérdidas iniciales por saturación, antes del drenaje, varían en función del tipo de árido empleado en el pavimento. Así mismo, se encontró que la pérdida inicial, debida a la saturación de la superficie y al almacenamiento en depresiones superficiales, es mayor en el pavimento de césped con refuerzos de hormigón, en comparación con la superficie impermeable convencional.

En otra aplicación, Pratt (1999b) estudia la posibilidad de almacenar y reutilizar el

agua de escorrentía empleando una sección estanca de firme permeable. La experiencia del Edwinstowe Youth Hostel, llevada a cabo con éxito en 1997, emplea el agua recogida en el aparcamiento permeable para surtir las cisternas de los servicios de la residencia. La sección empleada está compuesta por: superficie permeable de adoquines, 50 mm de gravilla, geotextil, subbase de árido de machaqueo (con un 30% de huecos) o de estructuras de plástico (con un 95% de huecos) y membrana impermeable.

También en el Reino Unido, Bray (2001) presenta los resultados de la pertinente monitorización de una cadena de drenaje sostenible construida en una zona de descanso de la autopista británica M42. Este conjunto de SUDS incluye un aparcamiento ejecutado con firmes permeables. Por su parte, Schlüter y Jefferies (2001) monitorizaron el caudal efluente de dos aparcamientos, de dos y cuatro años de antigüedad, contruidos con firmes permeables en Edimburgo. Para este estudio utilizan un aliviadero V-Notch que les permite extraer los siguientes parámetros de funcionalidad de los firmes:

- Porcentaje de lluvia que llega al efluente: entre el 14,2% y el 79,5%, dependiendo de la duración e intensidad del aguacero, siendo la media próxima al 50%.
- Tiempos de respuesta (lag time): 45 minutos de media y 145 minutos para aguaceros menores.
- Índice de precipitación antecedente (API_5 Antecedent Precipitation Index): indica que los firmes permeables dependen fuertemente de las condiciones anteriores.

Continuando en el Reino Unido, Abbott *et al.* (2003) realizan el seguimiento de dos emplazamientos en Inglaterra: en Wheatley y en Wokingham. La sección de Wheatley estaba compuesta por adoquines de hormigón poroso sobre 50 mm de arrocillo, una lámina de geotextil y 350 mm de subbase, separada de la explanada mediante una membrana impermeable. Por su parte, en Wokingham, la sección está compuesta por mezcla bituminosa porosa directamente sobre la subbase y una membrana impermeable. Durante la monitorización de ambos emplazamientos se observó una reducción sustancial de los picos de caudal efluente con ciertas influencias estacionales. Como continuación, Abbott y Comino-Mateos (2003) señalan que la infiltración a través de las juntas entre adoquines era cincuenta veces mayor que a través del hormigón poroso que constituye los propios adoquines, el cual terminó por colmatarse al cabo de diez meses. Además, la lluvia se monitorizó con un pluviómetro de cazoleta de 0,2 mm de sensibilidad y el caudal efluente mediante un vertedero en V tipo BS3680 con sonda ultrasónica situado en la correspondiente arqueta de control. Los resultados sirvieron a Kellagher *et al.* (2003) para generar los correspondientes modelos hidráulicos con el programa informático InfoWorks CS.

En Estados Unidos, Brattebo y Booth (2003) presentan los resultados de seis años de monitorización de un aparcamiento experimental construido en Renton, en el estado de

Washington. Este aparcamiento cuenta con nueve plazas de 3 m x 6 m: una plaza de pavimento impermeable de mezcla bituminosa, dos plazas de adoquines con huecos rellenos de gravilla, dos plazas de césped con refuerzos de hormigón, dos plazas de césped con refuerzos de plástico y dos plazas de grava con refuerzos de plástico. Para la monitorización de los caudales efluentes utilizan pluviómetros de cazoleta o balancín, guardando los datos cada quince minutos en un sistema de almacenamiento automático. En esta experiencia se considera evento de lluvia cualquier precipitación mayor o igual de 13 mm en veinticuatro horas, precedida de al menos veinticuatro horas sin llover (Washington State Department of Ecology, 1997). Posteriormente, en Kinston, se ha construido un aparcamiento experimental, para la monitorización de calidad y cantidad de agua infiltrada, con cuatro tipos de pavimentos permeables: adoquines con 8,5% de huecos, adoquines con 12,9% de huecos, refuerzos de hormigón y hormigón poroso (Collins *et al.*, 2006).

En Chile se han investigado pavimentos de hormigón poroso con la siguiente sección: superficie de hormigón poroso, base granular, subbase de material granular grueso y filtro geotextil o membrana impermeable (de Solminihac y Castro, 2002). En esta línea, existe una instalación piloto en el Campus de San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile, consistente en una zona de estacionamiento construida con hormigón poroso (Fernández *et al.*, 2003). Mientras en Brasil, Acioli *et al.* (2004) recogen el proceso de ejecución y monitorización de un aparcamiento experimental de 280 m² con dos tipos de pavimentos permeables: mezcla bituminosa porosa y césped reforzado con prefabricados de hormigón. Los primeros resultados obtenidos en este aparcamiento quedan recogidos por Acioli *et al.* (2005).

En Australia, Rankin y Ball (2004) analizan los resultados de diez meses de monitorización de la hidrología urbana de la calle Smith, en Manly, cerca de Sydney. En la construcción de esta calle se emplearon adoquines con ranuras Rocla Ecoloc, sobre arena de tamaño 5 mm, permitiendo la infiltración al terreno arenoso con una tasa de 145 mm/h. El estudio hidrológico consistió en la monitorización de los niveles de escorrentía para diferentes eventos de lluvia. Con la aplicación del firme permeable se logró una reducción del grado de impermeabilidad de la cuenca de un 45% a un 3%.

En resumen, se ha comprobado que la técnica constructiva de los firmes permeables está fuertemente consolidada en países referencia como Estados Unidos, Francia o el Reino Unido. Sirva como ejemplo del grado de aplicación en el Reino Unido la facturación de más de 400.000 m² de pavimento permeable en 2006 por parte de la empresa especializada Hanson-Formpave (Newman *et al.*, 2006).

II.5.2 ANÁLISIS DE ESPESORES

Para determinar los espesores de las distintas capas de las secciones permeables objeto del análisis experimental, se tomaron como referencia, además de las experiencias ya expuestas, los catálogos recogidos en la norma 6.1-IC (Instrucción de carreteras, 2003), las recomendaciones para el proyecto y diseño del viario urbano de Manchón *et al.* (2000), y el manual técnico de Euroadoquín (2004). Los tres catálogos tienen en común que cada sección está indicada para un tipo de explanada y tráfico concretos.

La norma 6.1-IC (Instrucción de carreteras, 2003) no recoge ninguna sección estructural de firme permeable para carreteras, ni contempla la utilización de pavimentos discontinuos. Por tanto, de este catálogo se toman como referencia únicamente las secciones compuestas por un espesor de mezcla bituminosa sobre zahorra artificial, por su similitud con algunas de las secciones permeables ya comentadas. Los espesores varían desde 35 cm de mezcla bituminosa sobre 25 cm de zahorra (sección 0031, correspondiente a una explanada tipo E3 y un tráfico T00), hasta 5 cm de mezcla sobre 35 cm de zahorra (sección 4211, correspondiente a una explanada tipo E1 y un tráfico T42).

Por otra parte, Manchón *et al.* (2000) presentan un catálogo práctico de secciones reales de viario urbano, con un total de ciento noventa y cinco soluciones adoptadas por diferentes profesionales, entidades y normativas municipales. Estas secciones son de naturaleza puramente empírica, contrastadas por la práctica, y fundamentalmente se encuentran del lado de la seguridad. En este catálogo sí se incluyen algunas secciones permeables (de la 95 a la 103), pero únicamente indicadas para espacios peatonales. Por tanto, como referencia y aún no siendo permeables, se seleccionan algunas secciones de firmes con pavimento de adoquines (de la 169 a la 174) y otras con mezcla bituminosa (de la 181 a la 192). Estas secciones están compuestas por: adoquines, cama de arena y subbase granular (Figura II-7) o mezcla bituminosa sobre zahorra y en su caso, suelo granular (Figura II-8).

Por último, el manual de Euroadoquín (2004) ofrece una completa referencia para la construcción de firmes con pavimento de adoquines. Obviando las secciones que utilizan base de hormigón, se toman como orientación aquellas que emplean capas granulares. Así, con adoquines de 10 cm de espesor, sobre cama de arena y 25 cm zahorra artificial, se puede llegar a resistir un tráfico de cincuenta a ciento cincuenta vehículos pesados día, siempre que la explanada sea del tipo E3. Mientras, con adoquines de 8 cm de espesor, sobre cama de arena y 35 cm de capa granular, de menor calidad que la zahorra, se pueden llegar a resistir de quince a veinticinco vehículos pesados por día, contando con una explanada tipo E1, de menor calidad.

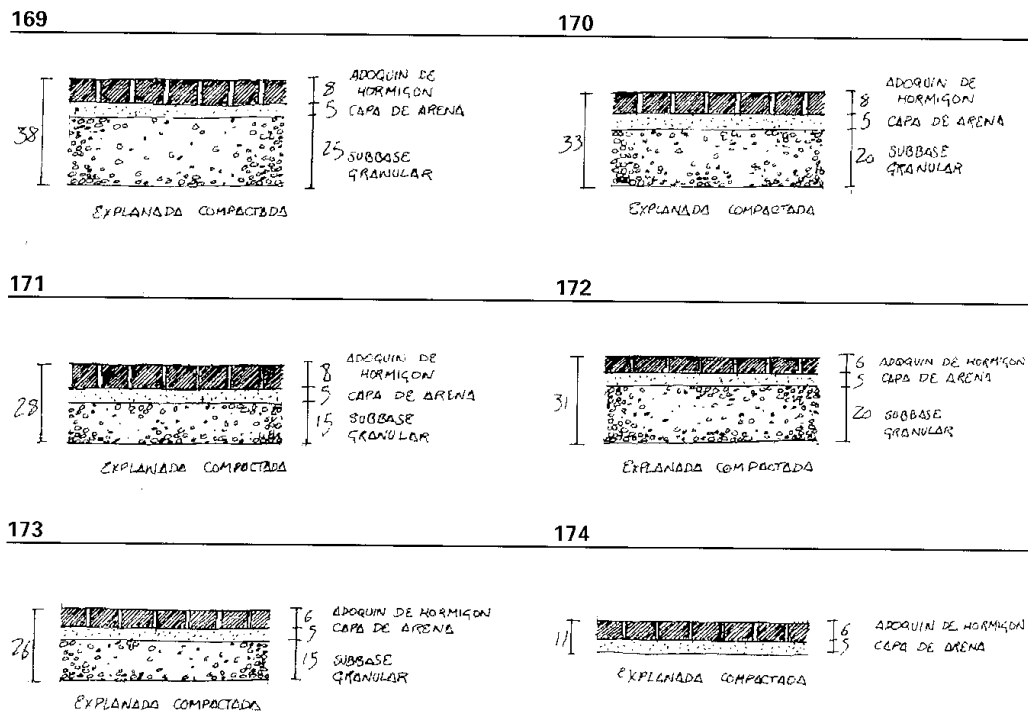


Figura II-7. Secciones de firmes urbanos con adoquines (Manchón *et al.*, 2000).

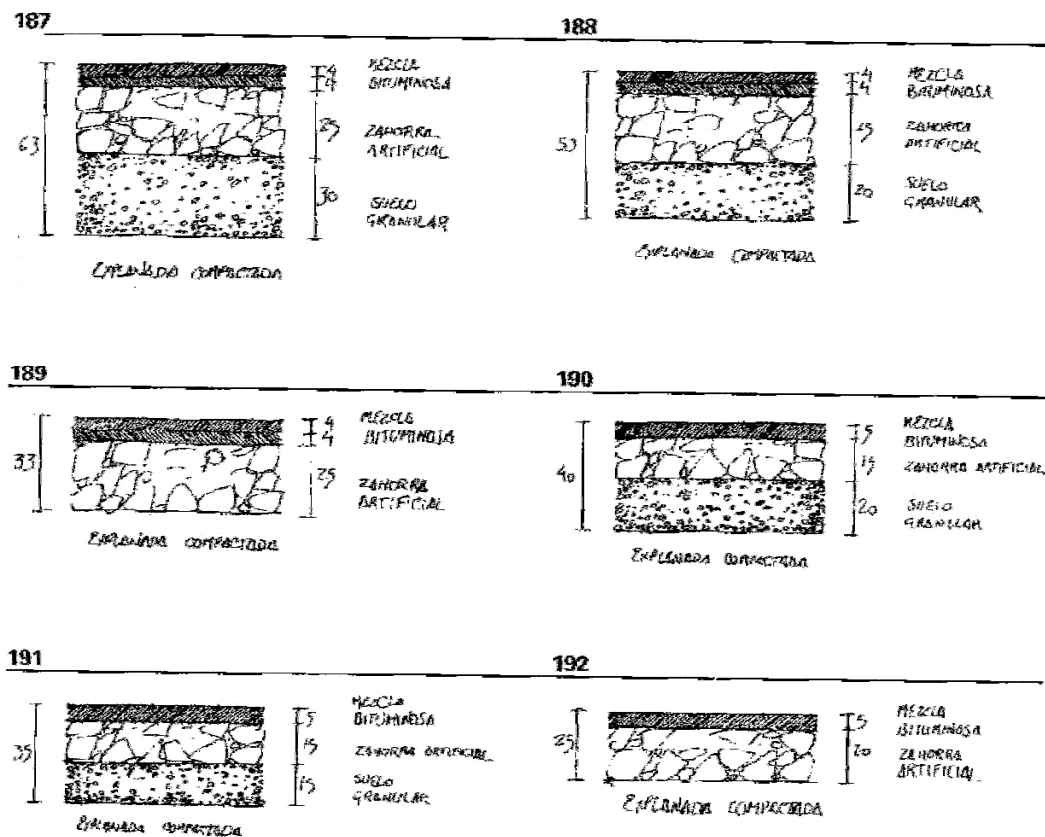


Figura II-8. Secciones de firmes de pavimentos urbanos con mezcla bituminosa (Manchón *et al.*, 2000).

II.5.3 ELECCIÓN FINAL

A modo de conclusión del estudio del estado de la técnica de los firmes permeables, se realiza una selección de las secciones permeables que van a ser objeto del análisis experimental de esta tesis. Estas secciones permeables estarán compuestas por un pavimento permeable y las correspondientes capas inferiores.

La elección de los pavimentos permeables de entre los cuatro tipos básicos identificados, se realiza en función de la revisión bibliográfica atendiendo al número máximo de experiencias previas y a su máximo potencial de aplicación en vías urbanas. Además, se tiene en cuenta la experiencia de la Universidad de Coventry, colaboradora en el proyecto FIDICA, en la investigación sobre adoquines con ranuras, y la experiencia del Laboratorio de Caminos de la Universidad de Cantabria en la investigación sobre mezclas bituminosas porosas. Por tanto, los pavimentos permeables elegidos para su análisis experimental son:

- Adoquines con ranuras: como representante de los pavimentos permeables discontinuos.
- Mezcla bituminosa porosa: como representante de los pavimentos permeables continuos.

Por su parte, la elección de las capas inferiores de los firmes permeables se realiza del mismo modo, en función del estudio del estado del arte, siendo las capas granulares claramente las más empleadas y con mayor potencial futuro. Respecto al tipo de áridos a estudiar se priman los criterios de disponibilidad por parte de las canteras cercanas y la experiencia del Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) en el trabajo con RCDs (Residuos de Construcción y Demolición). Por tanto, los áridos seleccionados para constituir las capas granulares inferiores de los firmes permeables objeto del análisis experimental son:

- Áridos artificiales calizos: representantes de la construcción tradicional.
- Áridos reciclados: representantes de la construcción sostenible.

Las secciones permeables propuestas permiten la comparación de dos tipos de pavimentos permeables (adoquines y asfalto poroso) y dos tipos de áridos como subbase drenante (caliza de cantera y reciclado de construcción), resultando las cuatro combinaciones posibles recogidas en la Tabla II-4. Respecto al resto de materiales de las secciones permeables, se emplearán, en la medida de lo posible los mismos geosintéticos y estructuras de plástico para el drenaje subterráneo del agua infiltrada a través del firme. Finalmente, la Figura II-9 recoge los espesores de las distintas capas de los cuatro tipos de firmes permeables recogidos en la Tabla II-4, objeto del análisis experimental de esta tesis.

Tabla II-4. Secciones tipo de firmes permeables objeto de análisis experimental.

Denominación	Pavimento	Capas granulares
BA	Bloques de hormigón (adoquines prefabricados)	Árido Artificial calizo (zahorra drenante caliza)
BR	Bloques de hormigón (adoquines prefabricados)	Árido Reciclado (zahorra drenante reciclada)
PA	Mezcla bituminosa Porosa (aglomerado drenante)	Árido Artificial calizo (zahorra drenante caliza)
PR	Mezcla bituminosa Porosa (aglomerado drenante)	Árido Reciclado (zahorra drenante reciclada)

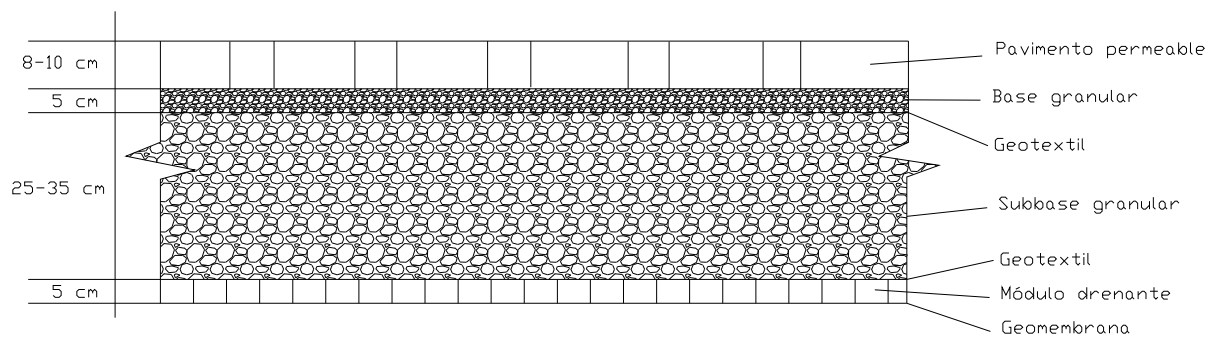


Figura II-9. Espesores de las secciones tipo de firme permeable objeto de análisis experimental.

CAPÍTULO III.- METODOLOGÍAS

III.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COLMATACIÓN EN LABORATORIO

III.1.1 INFILTRÓMETRO CÁNTABRO FIJO (ICF)

Para el ensayo de resistencia a la colmatación de pavimentos permeables en laboratorio, se diseñó un equipo específico denominado Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF). Este aparato, mostrado en la Figura III-1, está basado en el infiltrómetro empleado por Davies *et al.* (2002) en sus estudios de la capacidad de infiltración de escorrentía superficial a través de pavimentos permeables de adoquines con ranuras, realizados en la Universidad de Coventry.

La principal innovación que presenta el ICF respecto a su predecesor es el permitir la simulación de la lluvia directa sobre la superficie ensayada. Por tanto, este aparato cuenta con la simulación de la lámina de escorrentía superficial que llega desde la parte alta de la muestra de pavimento permeable y, además, con la simulación de la lluvia directa que se produce sobre la superficie de la muestra.

El ICF permite el ensayo de muestras de pavimentos permeables cuadradas de 500 mm de lado y está compuesto por los siguientes elementos fundamentales (Figura III-1):

- Bastidor regulable.
- Bandeja para la colocación de las muestras.
- Cámaras de recogida del agua infiltrada y de la escorrentía residual.
- Simuladores de escorrentía y de lluvia.

El bastidor con regulación de pendiente es de acero y cuenta con cuatro apoyos para la bandeja que soporta las muestras de pavimentos permeables. La altura de los dos apoyos posteriores del bastidor es regulable, permitiendo la variación de la inclinación de las muestras. Por su parte, la bandeja para la colocación de las muestras permite el paso del agua a través de su superficie mediante una reja metálica.

El ICF cuenta además con seis contenedores de recogida de agua en su parte inferior, cinco para recoger el agua filtrada a través del pavimento permeable y uno para la recogida de la escorrentía residual (Figura III-1). Las seis cámaras de recogida del agua tienen 100 mm de ancho y se distribuyen de tal manera que la cámara 1 recoge el agua filtrada a través de la parte más alta de la muestra de pavimento permeable y la cámara 5 recoge el agua filtrada a través de la parte más baja de la muestra, siendo la cámara 6 la encargada de recoger el agua de escorrentía residual al final de la muestra.

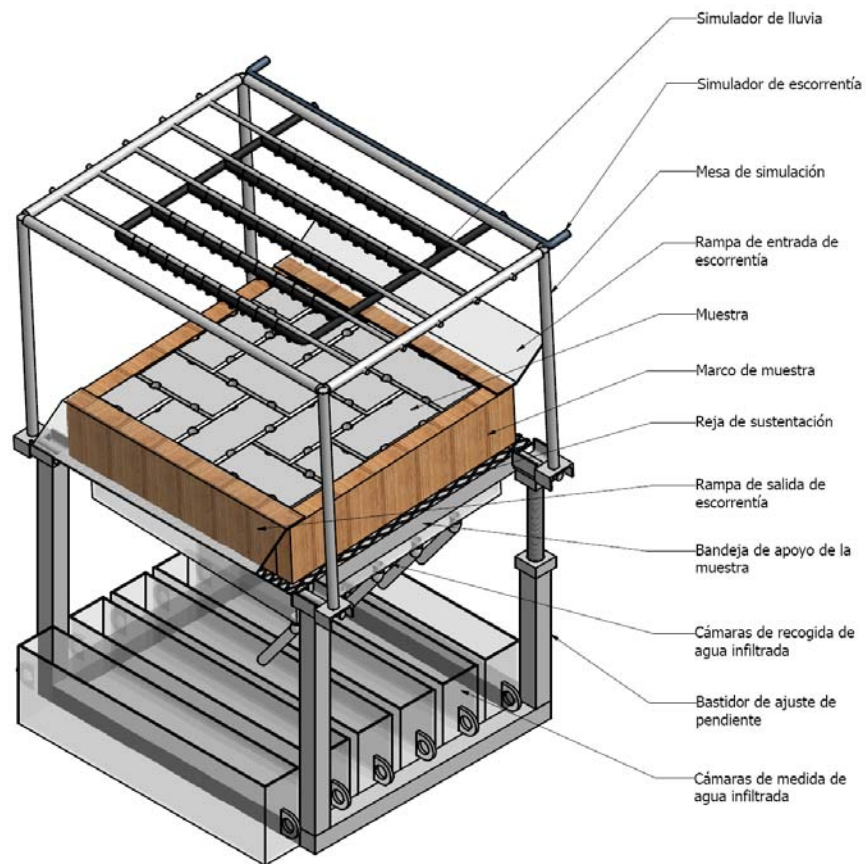


Figura III-1. Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF).

Los simuladores de escorrentía y de lluvia (Figura III-2) tienen caudales ajustables independientemente y están diseñados para permitir el aporte de agua a la muestra de pavimento permeable de dos formas distintas.

- Simulador de escorrentía: está compuesto por una tubería perforada situada sobre una rampa de plástico en la parte alta de la muestra, proporcionando una cortina de agua que llega a la muestra en forma de lámina de escorrentía superficial.
- Simulador de lluvia: está compuesto por cinco tuberías paralelas con quince goteros de caudal regulable cada una, permitiendo simular una precipitación uniforme directamente sobre la muestra de pavimento permeable ensayada.

Estos simuladores de escorrentía y de lluvia están acoplados a un marco superior situado por encima de las muestras de pavimento permeable a una altura de 500 mm sobre la bandeja de colocación de las mismas. El marco superior cambia de inclinación con la muestra, por lo que siempre se mantiene la misma distancia entre la superficie y los goteros que simulan la lluvia directa sobre la superficie permeable.

Con todo, el ICF permite evaluar la capacidad de infiltración de un pavimento permeable con diferentes inclinaciones, caudales entrantes de escorrentía superficial o intensidades de lluvia. Por tanto, las variables que el equipo permite estudiar son:

- Inclinación de la superficie: porcentaje de inclinación de la muestra de pavimento permeable.
- Escorrentía recibida: lámina de agua que simula la escorrentía superficial generada por una determinada superficie impermeable situada aguas arriba del pavimento permeable expuesta a la misma intensidad de lluvia simulada.
- Lluvia directa: intensidad de lluvia simulada directamente sobre la muestra de pavimento permeable mediante las cinco líneas de goteros regulables.

Los resultados que permite medir el ICF son:

- Cantidad de agua infiltrada a través de la muestra de 500 mm de ancho discretizada en cinco tramos iguales de 100 mm de ancho cada uno.
- Cantidad de agua de la escorrentía superficial residual al final de la muestra.

Todo ello fijando las condiciones de la muestra de pavimento permeable a ensayar:

- Tipo de pavimento.
- Condiciones de colmatación de la superficie.

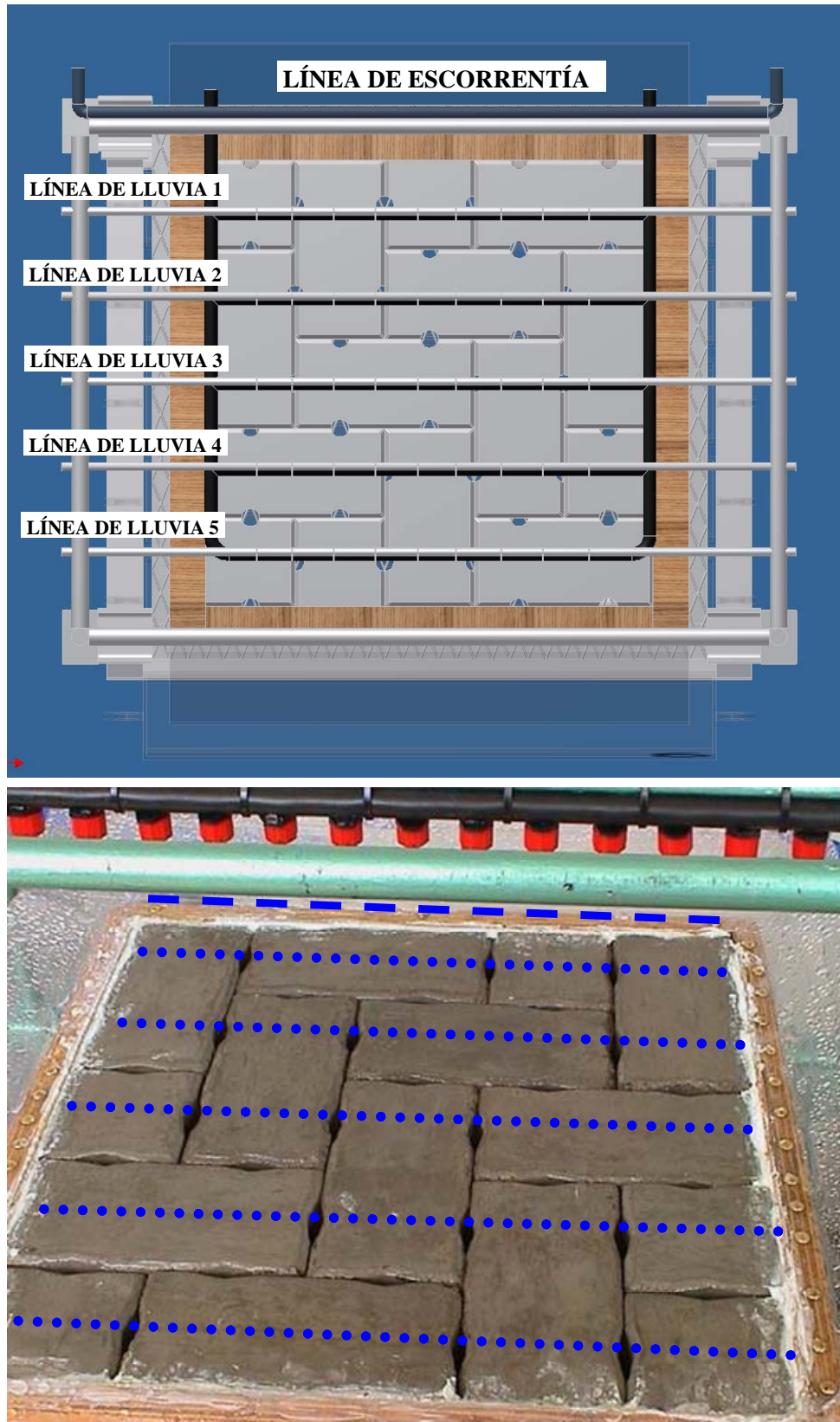


Figura III-2. Simulador de escorrentía y simulador de lluvia del ICF.

III.1.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Los ensayos de resistencia a la colmatación con el ICF se realizaron en dos etapas del análisis experimental de firmes permeables:

- Diseño de una geometría original de adoquín con ranuras: comparación de la resistencia a la colmatación de varias geometrías de adoquines con ranuras para apoyar la selección de una determinada.
- Análisis de pavimentos permeables: caracterización y comparación de la resistencia a la colmatación de pavimentos de adoquines con ranuras y de mezcla bituminosa porosa.

En la primera etapa fue necesaria la preparación de muestras de pavimentos permeables con distintas geometrías de adoquines con ranuras. En la segunda etapa fue necesaria la preparación de dos tipos de muestras: con el adoquín con ranuras seleccionado y con la mezcla bituminosa porosa. Los pavimentos permeables ensayados fueron colocados dentro de un marco de madera sobre la rejilla metálica de la bandeja para la colocación de muestras. En los tres casos, constaban de las siguientes capas:

- Lámina de geotextil de asiento.
- Base de arena gruesa sin finos con 50 mm de espesor.
- Superficie permeable ensayada.

El geotextil de asiento seleccionado para estos ensayos estaba fabricado con fibras de poliéster, siendo del tipo no tejido punzonado o agujeteado. De las características proporcionadas por el fabricante destacan su gramaje de 150 g/m^2 y su tasa de permeabilidad al paso de agua de $110 \text{ l/m}^2\cdot\text{s}$ (UNE EN ISO 11058, 1999). Este geotextil había demostrado tener unas propiedades adecuadas de filtro y separación durante las experiencias previas de Rodríguez *et al.* (2005). El geotextil se colocaba extendido sobre la rejilla metálica de la bandeja, dentro del encofrado de la muestra. La lámina de geotextil era cuadrada de 600 mm de lado, permitiendo 50 mm de doblado hacia arriba en el marco de madera (Figura III-3).

La base granular, situada sobre el geotextil, tenía 50 mm de espesor y estaba compactada y nivelada manualmente. El árido empleado fue una arena gruesa o arrocillo de origen calizo, procedente de una cantera local. Este árido fue tamizado en laboratorio, eliminando los finos y seleccionando los tamaños comprendidos entre 4 mm y 8 mm (Figura III-4). De este modo se obtuvo una capa granular con una capacidad de infiltración superior a la que pudiese tener la superficie permeable colmatada, evitando que se produjesen acumulaciones de agua debidas a una posible permeabilidad limitante de esta capa.



Figura III-3. Construcción de la muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación del geotextil de asiento.



Figura III-4. Construcción de la muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación de la base granular nivelada.

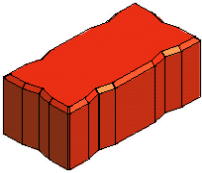
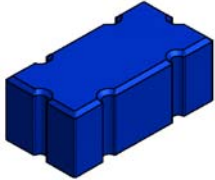
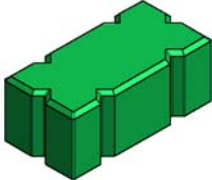
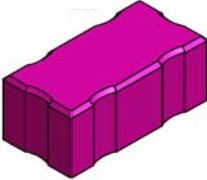
III.1.2.1 Geometrías de adoquines con ranuras

El diseño de una geometría original de adoquín con ranuras partió con una tormenta de ideas en la que se propusieron gran número de posibilidades. Las geometrías propuestas fueron evaluadas bajo los siguientes criterios fundamentales:

- Criterio 1: Geometría sencilla y ranuras libres.
- Criterio 2: Evitar irregularidades y aristas vivas.
- Criterio 3: Simetrías y múltiples combinaciones.

Tras el análisis de todas las propuestas, se preseleccionaron las doce geometrías recogidas en el *Anexo 1: Resistencia a la colmatación de distintas geometrías de adoquines con ranuras*. De estas doce geometrías se extrajeron las cuatro más representativas, recogidas en la Tabla III-1. Estas cuatro geometrías de adoquines fueron objeto del ensayo de resistencia a la colmatación en laboratorio.

Tabla III-1. Adoquines con ranuras con las cuatro geometrías seleccionadas para su estudio en laboratorio con el Infiltrómetro Cántabro Fijó (ICF).

Geometría del hueco o ranura			
Romboidal (B1)	Circular (B2)	Cuadrada (B3)	Elíptica (B4)
			

Estos cuatro diseños de adoquines presentan el mismo número de ranuras, seis, siendo la única diferencia entre ellos la geometría de las mismas. Esta puede ser con aristas (geometría triangular: bloques tipo B1 y B3) o sin aristas (geometría redondeada: bloques tipo B2 y B4), diferenciándose a su vez entre ellas por la mayor o menor longitud de la ranura.

Los dos parámetros encargados de representar la capacidad de infiltración de cada diseño fueron (Tabla III-2):

- Superficie de infiltración (SI): superficie libre para la infiltración proporcionada por cada adoquín.
- Resistencia a la colmatación (RC): parámetro a evaluar en el laboratorio.

Los cuatro diseños elegidos se adaptaron para que la superficie de infiltración (SI) fuese del mismo orden, permitiendo de este modo la posterior comparación de la resistencia a la colmatación (RC) mediante los ensayos en laboratorio con el ICF.

Tabla III-2. Parámetros de caracterización de la capacidad de infiltración de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras.

Parámetro	Geometría del hueco o ranura			
	Romboidal (B1)	Circular (B2)	Cuadrada (B3)	Elíptica (B4)
Superficie de Infiltración (SI)	600,0 mm ² (99% del máximo)	603,2 mm ² (100% del máximo)	600,0 mm ² (99% del máximo)	603,2 mm ² (100% del máximo)
Resistencia a la colmatación (RC)	ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COLMATACIÓN EN LABORATORIO			

Por otra parte, para valorar las características de capacidad portante de los futuros pavimentos permeables construidos con cada adoquín, se evaluaron los siguientes parámetros (Tabla III-3):

- Perímetro de contacto (PC): longitud del perímetro del adoquín que está en contacto con otros adoquines y que, multiplicada por el espesor del adoquín, representa el área de contacto disponible para la transmisión de las cargas del tráfico, expresada también en porcentaje.
- Ancho mínimo de sección (AM): longitud del lado menor del adoquín que se ve reducida por la disposición de las ranuras y que, multiplicada por el espesor del adoquín, representa la sección mínima del mismo, expresada también en porcentaje.

Tabla III-3. Parámetros de caracterización de la capacidad portante de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras.

Parámetro	Geometría del hueco o ranura			
	Romboidal (B1)	Circular (B2)	Cuadrada (B3)	Elíptica (B4)
Perímetro de Contacto (PC)	360 mm (60% del máximo)	504 mm (84% del máximo)	480 mm (80% del máximo)	408 mm (68% del máximo)
Ancho Mínimo (AM)	90 mm (90% del máximo)	84 mm (84% del máximo)	80 mm (80% del máximo)	92 mm (92% del máximo)

Además, se establecieron los parámetros para las valoraciones de la estética y de la comodidad ofrecidas por cada geometría (Tabla III-4).

- Valoración del fabricante (VF): opinión cuantificada del fabricante (Bloques Montserrat) respecto a la estética del diseño y sus posibles disposiciones, así como su sencillez de producción, manejo y puesta en obra.
- Comodidad de tránsito (CT): ancho de las ranuras formadas por dos canales coincidentes de sendos adoquines adyacentes, o porcentaje de la diferencia respecto al máximo establecido de 15 mm.

La comodidad del tránsito sobre un pavimento permeable de adoquines con ranuras se valora en función de las posibles molestias que pueda ocasionar el uso de tacones, bastones, muletas o carritos de ruedas estrechas. Así, esta comodidad se considera mayor cuanto menor sea el ancho resultante de las ranuras, formadas por la coincidencia de dos estrías o canales correspondientes a dos adoquines adyacentes. Minimizando este valor se limita el riesgo de penetración de elementos asociados al tránsito sobre la superficie, como por ejemplo los tacones del calzado. Por tanto, un mayor porcentaje ocupado respecto al máximo fijado en 15 mm como referencia de comodidad, asegura una mayor continuidad de la pisada, el apoyo o la rodada de una rueda estrecha.

Tabla III-4. Parámetros de caracterización de estética y comodidad de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras.

Parámetro	Geometría del hueco o ranura			
	Romboidal (B1)	Circular (B2)	Cuadrada (B3)	Elíptica (B4)
Valoración del fabricante (VF)	Sobresaliente (95% del máximo)	Notable (80% del máximo)	Bien (65% del máximo)	Sobresaliente (95% del máximo)
Comodidad de tránsito (AR)	5 mm (67% de diferencia respecto al máximo)	8 mm (47% de diferencia respecto al máximo)	10 mm (33% de diferencia respecto al máximo)	4 mm (73% de diferencia respecto al máximo)

Una vez caracterizadas las cuatro geometrías de adoquines objeto del ensayo de resistencia a la colmatación en laboratorio, se construyeron veinte prototipos de cada una de ellas. Este número de adoquines permitió montar y desmontar las muestras de pavimento permeable necesarias para el ensayo de cada geometría. La fabricación de los prototipos se realizó vertiendo el hormigón sobre moldes de madera contruidos con cada una de las geometrías marcadas, realizando posteriormente el curado al aire.

La resistencia a la rotura de los prototipos resultantes según la UNE-EN 1338 (2004) fue de 2,10 MPa de media, menor que la mínima exigida de 3,60 MPa debido a que el proceso de fabricación no fue el propio de los adoquines comerciales producidos en serie.

Cada muestra a ensayar era montada sobre la base de gravilla dentro del marco cuadrado de 500 mm de lado. Los adoquines se situaban siempre siguiendo la misma disposición (Figura III-5). Los bloques eran colocados a tope y nivelados para obtener una superficie plana, impidiendo posibles acumulaciones de agua. Tras colocar todos los adoquines, se apretaban los tornillos del marco para ajustar la muestra y se sellaba el perímetro para evitar la infiltración en los bordes de contacto entre el marco y los adoquines (Figura III-5). Una vez impermeabilizada perimetralmente, la muestra estaba preparada para el ajuste de las condiciones de colmatación y su correspondiente ensayo en el ICF.



Figura III-5. Construcción de la muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación de los adoquines y sellado perimetral.

III.1.2.2 Adoquín con ranuras seleccionado

Para la caracterización de la resistencia a la colmatación de un pavimento permeable de adoquines con ranuras se seleccionó el adoquín para pavimentos permeables de Bloques Montserrat (Figura III-6). Esta geometría está recogida en la solicitud de patente de diseño industrial de título “Adoquín para pavimento”, con número de expediente D0502335-1 y fecha de prioridad 11 de noviembre de 2005.

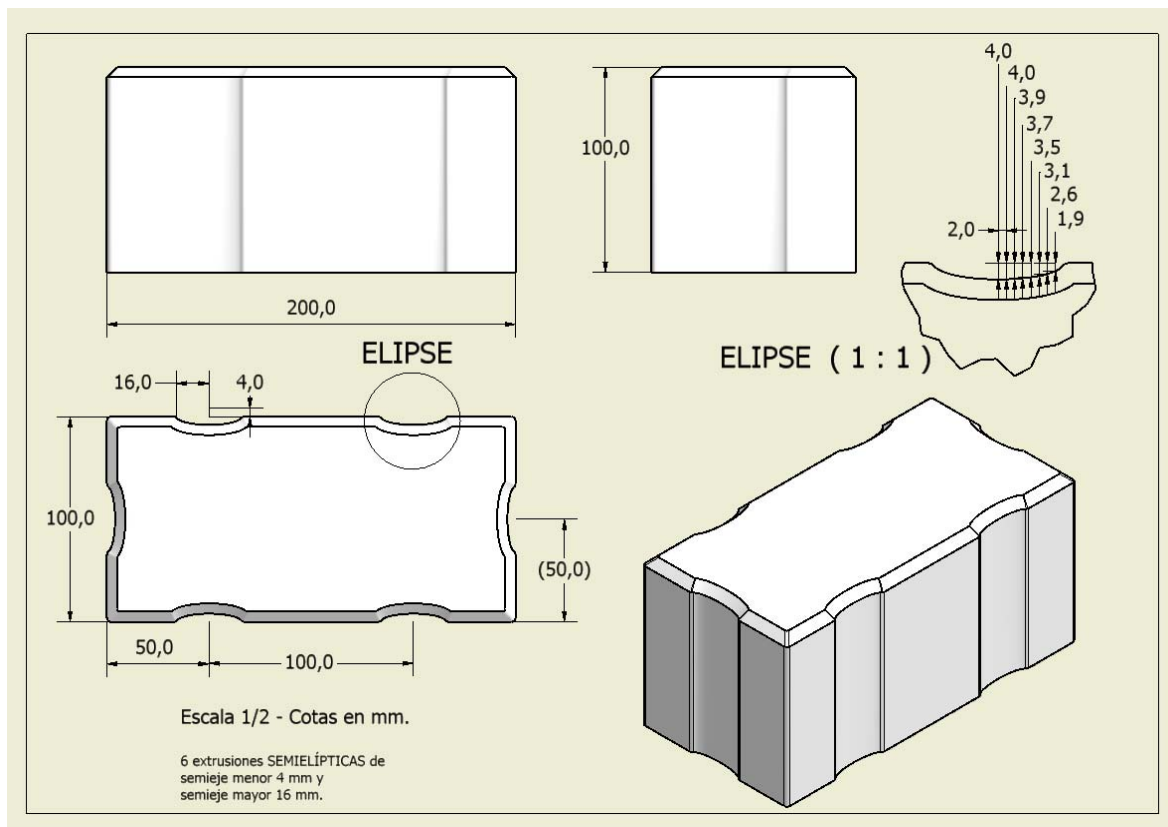


Figura III-6. Adoquín para pavimentos permeables de Bloques Montserrat.

La superficie de infiltración por cada adoquín es de 6 cm^2 , gracias a sus seis estrías semi-elípticas, lo que supone un 3% de área libre para el paso del agua respecto a la superficie en planta del bloque rectangular. El espesor del adoquín es de 10 cm y el peso de cada unidad son 4,5 kg. Estos valores aseguran una correcta capacidad portante de los pavimentos permeables construidos con este tipo de bloque, ofreciendo una mayor superficie de contacto lateral y estabilidad que los prototipos fabricados anteriormente con 8 cm de espesor. Además, este adoquín ejecutado en serie presenta un acabado en doble capa que ofrece una alta calidad estética en todas sus disposiciones posibles.

La Figura III-7 muestra la realización del ensayo de resistencia a la rotura de la primera serie fabricada de este tipo de adoquín. Los resultados obtenidos del ensayo quedan recogidos en la Tabla III-5. Como se puede comprobar, se cumplieron las condiciones exigidas por la norma UNE-EN 1338 (2004) para una muestra de 8 adoquines:

- Resistencia T de cada uno de los adoquines mayor o igual que 3,6 MPa.
- Carga de rotura F mayor o igual que 250 N/mm.

En consecuencia, la primera serie fabricada de adoquines para pavimentos permeables Montserrat resultó aceptada y se tomaron de ella los bloques necesarios para la realización de los ensayos de resistencia a la colmatación en laboratorio.



Figura III-7. Ensayo de resistencia a la rotura de los adoquines (UNE-EN 1338, 2004).

Tabla III-5. Resultados de los ensayos de resistencia a la rotura según la norma UNE-EN 1338 (2004) del adoquín con ranuras elípticas fabricado en serie.

MUESTRA Nº	CARGA DE ROTURA (P)	RESISTENCIA A ROTURA (T)	CARGA DE ROTURA POR UNIDAD DE LONGITUD (F)
1	106900 N	4,0 MPa	560 N/mm
2	102600 N	3,8 MPa	540 N/mm
3	103800 N	3,9 MPa	550 N/mm
4	95600 N	3,6 MPa	500 N/mm
5	110200 N	4,1 MPa	580 N/mm
6	118100 N	4,4 MPa	620 N/mm
7	102600 N	3,8 MPa	540 N/mm
8	96100 N	3,6 MPa	500 N/mm
MEDIA	104488 n	3,9 MPa	549 N/mm

III.1.2.3 Mezcla bituminosa porosa

La mezcla bituminosa porosa empleada para los ensayos de resistencia a la colmatación fue una mezcla en caliente tipo PA-12 (PG-3, 2007). El aglomerado fue fabricado en planta con betún modificado BM-3b y posteriormente recalentado en el laboratorio, siendo compactado en el interior de moldes metálicos. De este modo fueron preparadas seis probetas cuadradas de 500 mm de lado y 100 mm de altura para su ensayo en el ICF.

Cada probeta fue caracterizada previamente a su colocación en el ICF (Figura III-8). Los huecos en mezcla se midieron de manera geométrica a partir del peso y las dimensiones finales de cada probeta. La altura se obtuvo como promedio de ocho medidas realizadas con calibre. Además, se realizaron ensayos de permeabilidad en los puntos medios de la superficie de las probetas con el permeámetro LCS, según la norma NLT-327/00 (2000).

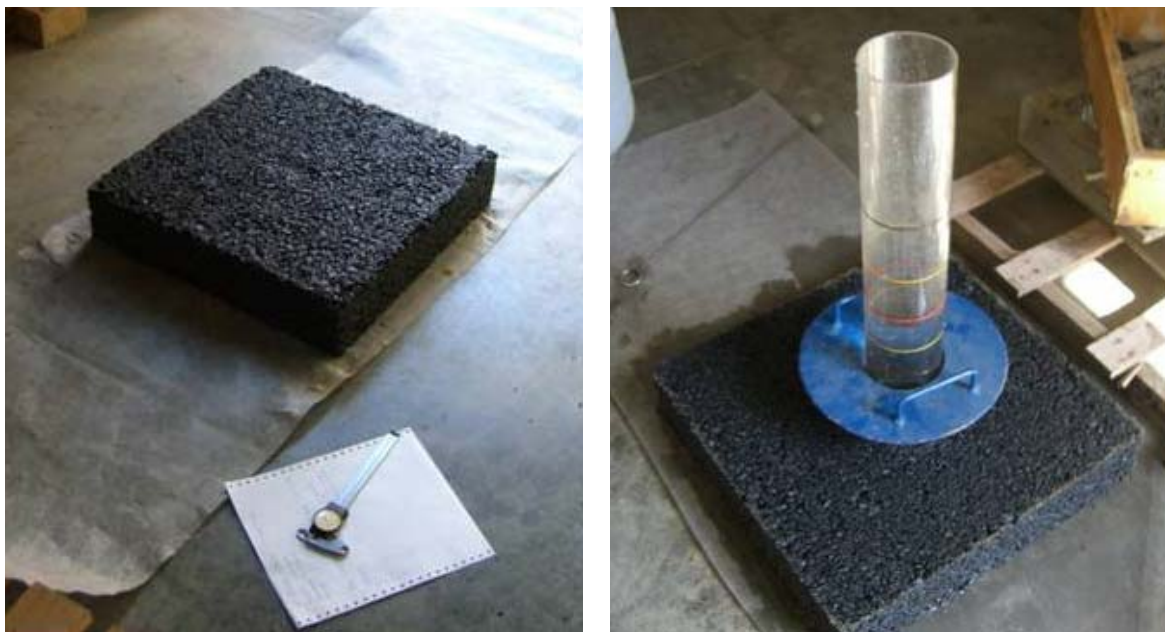


Figura III-8. Caracterización de una probeta de mezcla bituminosa porosa antes de su ensayo en el ICF.

Los resultados obtenidos de la caracterización geométrica se muestran en la Tabla III-6. Los huecos en mezcla medidos geoméricamente varían entre los valores de 27,8% y 32,9%, con un promedio de 29,4%. Estos porcentajes de huecos son relativamente altos, estando claramente por encima del límite inferior de 20% necesario para considerar la mezcla bituminosa como porosa.

Tabla III-6. Características de las probetas de mezcla bituminosa porosa a ensayar con el ICF.

Probeta	Peso (kg)	Altura media (cm)	Densidad (t/m3)	Huecos en mezcla (%)
1	49,40	10,28	1,92	28,0
2	46,30	10,33	1,79	32,9
3	51,85	11,24	1,85	30,9
4	51,45	10,79	1,91	28,6
5	51,40	10,66	1,93	27,8
6	51,70	10,82	1,91	28,5
MEDIA	50,35	10,68	1,88	29,4

Por su parte, la Tabla III-7 recoge los tiempos de drenaje obtenidos con el permeámetro LCS, los porcentajes de huecos en mezcla asociados, según la relación dada por el MOPU (1987), y la especificación de la cara de fabricación de la probeta sobre la que se realizó el ensayo con el LCS y posteriormente con el ICF. El rango de valores de huecos en mezcla según la drenabilidad va desde el 20,2% hasta el 30,0%, observándose una mayor variabilidad que en el caso de la caracterización geométrica. Esta variabilidad puede ser debida a que los huecos medidos geoméricamente son el valor medio de toda la probeta mientras que los estimados con el permeámetro LCS dependen del punto central de la superficie.

Tabla III-7. Tiempos de infiltración obtenidos con el permeámetro LCS sobre las probetas de mezcla bituminosa a ensayar con el ICF.

Probeta	Tiempo medio entre marcas (s)	Estimación de los huecos en mezcla (%)	Superficie de ensayo
1	33,0	20,2	Cara INFERIOR
2	15,7	25,2	Cara INFERIOR
3	27,3	21,3	Cara INFERIOR
4	11,1	28,1	Cara SUPERIOR
5	8,9	30,0	Cara SUPERIOR
6	13,7	26,3	Cara SUPERIOR
MEDIA	18,3	25,2	MEDIA

Comparando los huecos en mezcla de la Tabla III-6 con los recogidos en la Tabla III-7, se puede observar que las probetas 1, 2 y 3 presentan valores más altos medidos geoméricamente que los obtenidos a partir del permeámetro LCS. Estas tres primeras probetas fueron dadas la vuelta y colocadas con la cara inferior de fabricación hacia arriba, previamente a la medición con el permeámetro LCS. Esta cara mostraba un aspecto ligeramente más cerrado que la cara superior de fabricación, lo cual podría explicar esta

diferencia de valores.

Por su parte, las tres probetas siguientes, 4, 5 y 6, se ensayaron sin dar la vuelta; es decir, manteniendo la cara superior de fabricación como superficie de ensayo con el permeámetro LCS y posteriormente con el ICF. Así, se puede observar que los huecos en mezcla de la Tabla III-7 correspondientes a estas probetas, se sitúan en valores más próximos a los huecos en mezcla medidos geoméricamente, recogidos en la Tabla III-6. Incluso se llegan a obtener valores superiores con el permeámetro LCS, como en el caso de la probeta 5. Por tanto, se comprueba que el método de fabricación empleado, fundamentalmente la compactación en laboratorio de una única tongada de 10 cm de espesor en un molde metálico, produce una cierta segregación que hace que la permeabilidad sea ligeramente decreciente desde la cara superior de fabricación hasta la cara inferior de fabricación. Pratt *et al.* (2002) indican que un correcto diseño de un firme permeable es aquel en el que la permeabilidad de las diferentes capas es creciente con la profundidad. Según esto, un diseño adecuado de un pavimento de mezcla bituminosa porosa consistiría en un sistema bicapa en el que la permeabilidad de la capa superficial fuera menor que la permeabilidad de la parte inferior. Como aproximación del sistema bicapa, las probetas 1, 2 y 3 dadas la vuelta pueden ser consideradas como un pavimento con capacidad de infiltración creciente, mientras que las probetas 4, 5 y 6 sin voltear representarían a un pavimento de capacidad de infiltración decreciente con la profundidad.

Una vez caracterizadas, las probetas eran colocadas sobre la base granular en el marco de madera del ICF y se sellaba el perímetro de la muestra para evitar la infiltración en los bordes de contacto (Figura III-9). De este modo la muestra de pavimento permeable con mezcla bituminosa porosa quedaba lista para el ajuste de las condiciones de colmatación y su ensayo de resistencia a la colmatación en el ICF.



Figura III-9. Construcción de una muestra de pavimento permeable para ensayar en el ICF: colocación de la mezcla bituminosa porosa y sellado perimetral.

III.1.3 CONDICIONES DE COLMATACIÓN

Del estudio bibliográfico realizado se extrae que el tipo y la cantidad de sedimento que puede producir la colmatación de los pavimentos permeables son dos factores que dependen de un gran número de variables. El tipo de sedimento depende fundamentalmente de la naturaleza de los materiales que rodean el emplazamiento donde se sitúa el pavimento permeable, como por ejemplo el suelo de la zona: arcilla, arena, cal, sílice, etc. Por su parte, la cantidad de sedimento depende de variables que condicionan el aporte de los mismos como son: la proximidad de materiales sueltos, la acción del viento, el régimen de precipitaciones o el riesgo de erosión o degradación de los materiales próximos.

Dada la amplia variabilidad de posibles materiales y con el objeto de fijar un sedimento único para todos los ensayos, se seleccionó como sedimento el reciclado de construcción compuesto por: hormigón, ladrillos, cristales, metales, madera, cal, etc. Este material tenía un porcentaje de materia orgánica del 3%, obtenido mediante el método de dicromato de potasio para partículas de tamaño inferior a 2mm, y del 5% de pérdida por calcinación. La granulometría de las partículas (Figura III-10) fue siempre la misma, siendo la correspondiente al sedimento fabricado por Davies *et al.* (2002). La cantidad de sedimento empleada en los ensayos se fijó por escenarios con método de aplicación siempre realizados en seco.

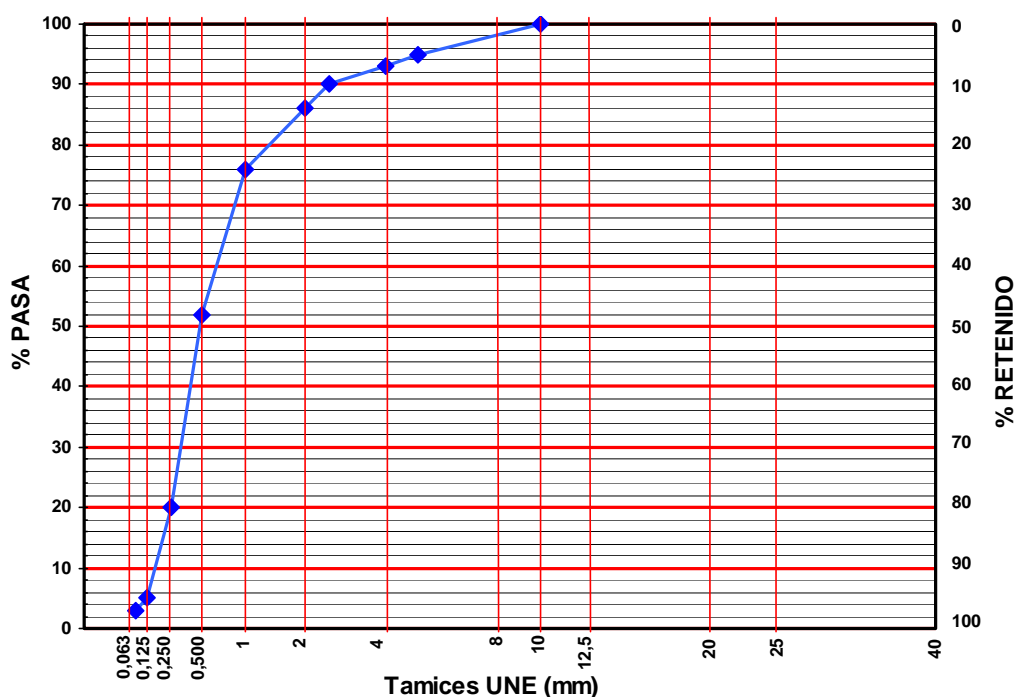


Figura III-10. Granulometría del sedimento empleado para simular la colmatación en todos los ensayos realizados con el ICF (Davies *et al.*, 2002).

III.1.3.1 Geometrías de adoquines con ranuras

Para la evaluación de la resistencia a la colmatación de cada geometría de adoquines se plantearon tres escenarios con distintos grados de colmatación:

- Superficie recién colocada (escenario 1): En este escenario el pavimento está nuevo y no existe ningún tipo de sedimento que dificulte la infiltración (0 g sobre la muestra).
- Superficie semi-colmatada (escenario 2): En este escenario se simula un estado de colmatación media, igual para todas las geometrías, provocado por una carga de sedimento fija de 2 kg/m^2 , lo cual supone rellenar las ranuras de la muestra de pavimento permeable de $0,25 \text{ m}^2$ con 500 g de sedimento.
- Superficie colmatada al máximo (escenario 3): En este escenario se simula el estado pésimo del pavimento permeable mediante la adición de la máxima cantidad de sedimento posible en el interior de las ranuras libres correspondientes a cada geometría.

La selección de los dos primeros escenarios de colmatación permitirá la comparación de la capacidad de infiltración propia de cada geometría de adoquín sin colmatar y bajo la misma cantidad de sedimento (500 g). Además, el tercer escenario permitirá analizar qué bloque tiene una mayor tolerancia a la sedimentación, conociendo la cantidad de sedimento empleada para simular la colmatación máxima.

El método de aplicación del sedimento para simular la colmatación de cada muestra de pavimento permeable de adoquines, se iniciaba con el vertido repartido de una cantidad fija de sedimento preparado sobre las ranuras de la superficie de $0,25 \text{ m}^2$: 500 g para el escenario de semi-colmatación y 1000 g para el escenario de colmatación máxima (etapas 1, 2 y 3 en la Figura III-11). A continuación, el sedimento introducido en los huecos se compactaba manualmente (etapa 4 en la Figura III-11).

En el caso de la simulación de la colmatación máxima, el exceso de sedimento que no entraba en las ranuras se repartía a lo largo de los bordes del adoquín, asegurando la obstrucción de todas las juntas (etapas 5 y 6 en la Figura III-11). Después, el sedimento sobrante era recogido y pesado para comparar la cantidad exacta empleada en la simulación con respecto a los 1000 g aportados inicialmente. Además, este sedimento sobrante era tamizado para obtener su granulometría y poderla comparar con la inicial, comprobando si todos los tamaños habían sido empleados por igual en todos los casos.

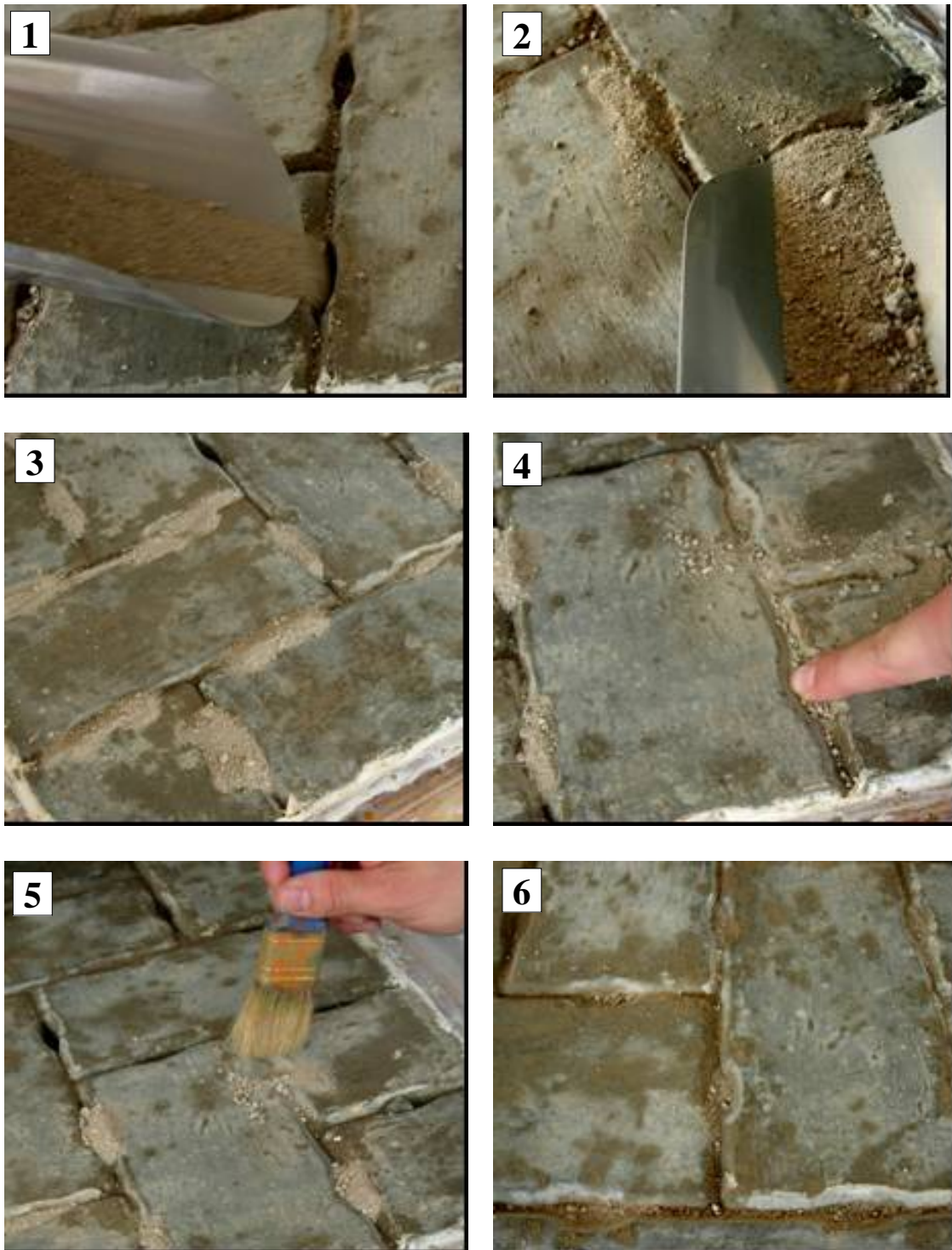


Figura III-11. Etapas de la simulación de la colmatación de un pavimento de adoquines mediante el relleno de las ranuras con sedimento.

III.1.3.2 Adoquín con ranuras seleccionado

El adoquín con ranuras seleccionado para su comparación con la mezcla bituminosa porosa tiene 10 cm de espesor frente a los 8 cm de los prototipos con distintas geometrías de ranuras. Este mayor espesor supone contar con 60 cm³ de volumen libre para la acumulación del sedimento en lugar de 48 cm³. Dado este mayor volumen, las condiciones de colmatación máxima serán diferentes, soportando una mayor carga de sedimento. Por esta razón, fue necesario ampliar el rango de estudio de resistencia a la colmatación de tres a cuatro escenarios, añadiendo un quinto escenario con simulación de mantenimiento para permitir un mayor conocimiento de este pavimento permeable.

Los escenarios de colmatación fijados para el ensayo con el ICF del pavimento permeable de adoquines con ranuras elípticas de Bloques Montserrat fueron:

- Superficie recién colocada (escenario 1): En este escenario la superficie de adoquines está nueva y no existe ningún tipo de sedimento que dificulte la infiltración a través de las ranuras libres.
- Superficie semi-colmatada (escenario 2): En este escenario se simula el estado de colmatación medio provocado por una carga de sedimento de 2 kg/m², lo cual supone rellenar las ranuras de la muestra de 0,25 m² con 500 g de sedimento.
- Superficie colmatada (escenario 3): En este escenario se simula el estado de colmatación provocado por una carga de sedimento de 4 kg/m², lo cual supone rellenar las ranuras de la muestra de 0,25 m² con 1000 g de sedimento.
- Superficie colmatada al máximo (escenario 4): En este escenario se simula el estado pésimo del pavimento con las ranuras y las juntas entre adoquines rellenas con sedimento compactado (Figura III-12).
- Superficie colmatada al máximo con mantenimiento (escenario 5): En este escenario se simula una actuación de mantenimiento mediante un barrido de la superficie sobre el estado anterior de colmatación máxima.

El escenario 1 no requirió de ningún proceso de colmatación. Para el resto de escenarios, el sedimento se preparó en bandejas de 500 g. En el caso de los escenarios 2 y 3, la metodología de aplicación del sedimento fue el vertido repartido de la cantidad fijada (500 g ó 1.000 g) en las ranuras creadas por los adoquines en la superficie. Este vertido de sedimento en las ranuras era seguido de una ligera compactación manual del mismo.



Figura III-12. Pavimento de adoquines con ranuras colmatado al máximo.

El escenario 4 requirió de una tercera bandeja de 500 g de sedimento. Esto supuso una labor complementaria de compactación y reparto de la carga extra de partículas entre las ranuras de la superficie con el objetivo de lograr una superficie completamente colmatada por el sedimento. El exceso de sedimento que no entraba en las ranuras se repartía a lo largo de los bordes del adoquín, asegurando la obstrucción de todas las juntas. Después, el sedimento sobrante presente en la superficie de los adoquines era convenientemente recogido y pesado para obtener la cantidad exacta empleada en la simulación del bloqueo completo del pavimento.

Por último, el escenario 5 se obtenía a partir del escenario 4 mediante un barrido superficial con un cepillo de limpieza de cerdas duras. Con este barrido se pretende simular un proceso de mantenimiento sobre una superficie permeable de adoquines con ranuras con el objetivo de recuperar al menos una parte de la capacidad de infiltración perdida por la acumulación pésima de sedimento.

III.1.3.3 Mezcla bituminosa porosa

La mezcla bituminosa porosa tiene un volumen de huecos accesible para el sedimento mucho menor que los 60 cm^3 de los adoquines para pavimentos permeables de Bloques Montserrat. Por esta razón, fue necesario ajustar el rango de estudio de resistencia a la colmatación a dos escenarios, añadiendo un tercer escenario con simulación de mantenimiento para permitir el análisis de su efecto en este tipo de pavimento.

Los escenarios de colmatación fijados para el ensayo con el ICF del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa fueron:

- Superficie recién colocada (escenario 1): En este escenario la superficie de mezcla bituminosa porosa está nueva y no existe ningún tipo de sedimento que dificulte la infiltración a través de los huecos.
- Superficie colmatada al máximo (escenario 2): En este escenario se simula el estado pésimo del pavimento provocado por una cantidad de sedimento de 2 kg/m^2 , lo cual supone un aporte de 500 g sobre muestra de $0,25 \text{ m}^2$.
- Superficie colmatada al máximo con mantenimiento (escenario 3): En este escenario se simula una actuación de mantenimiento mediante un barrido de la superficie sobre el estado anterior de colmatación máxima.

El escenario 1 no requirió de preparación de sedimento. Mientras, para los escenarios 2 y 3 se prepararon bandejas de 500 gramos de sedimento con la granulometría indicada en la Figura III-10. Para simular el escenario 2, se vertía una bandeja completa sobre la superficie. A continuación, se rellenaban los huecos y se compactaba manualmente el sedimento, sin retirar el sobrante que no entrase en los huecos de la superficie.

Para simular el escenario 3, se aportaba la misma cantidad de sedimento que en el escenario anterior, con la diferencia de que una vez rellenados los huecos mediante compactación manual, el exceso de sedimento se retiraba mediante un barrido que simula el mantenimiento. Este exceso de sedimento cepillado era pesado para el cálculo de la cantidad exacta presente en la superficie tras la simulación del mantenimiento.

De este modo, el escenario 2 pretende simular la ausencia del mantenimiento y el escenario 3 la acción del mismo, ambos partiendo de una misma carga de sedimento fijada en 2 kg/m^2 . Las diferencias entre los tres escenarios quedan recogidas en la Figura III-13 que permite la comparación visual del estado final de simulación de la colmatación en cada caso.



Figura III-13. Pavimento de mezcla bituminosa porosa bajo los tres escenarios de colmatación simulados: recién colocado, colmatado y colmatado con mantenimiento.

III.1.4 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COLMATACIÓN

En la primera etapa de la investigación con el ICF, este ensayo se realizó con cuatro geometrías de adoquines sometidas a tres escenarios de colmatación. Cada uno de los escenarios de colmatación fue ensayado con cuatro valores de inclinación del pavimento:

- 0%: superficie horizontal nivelada.
- 2%: inclinación comúnmente usada en drenaje de carreteras.
- 5%: inclinación intermedia.
- 10%: inclinación extrema en la mayoría de los pavimentos urbanos.

Las muestras de pavimento permeable fueron sometidas a la simulación de escorrentía superficial y de lluvia directa, ambas con una intensidad de precipitación fijada. La lámina de escorrentía superficial era equivalente a la que se produciría en un área impermeable igual a la ensayada (0,25 m²) bajo la intensidad de lluvia fijada. Mientras, la precipitación directa simulada sobre la superficie tenía dicha intensidad. Esta intensidad fijada varió dentro del intervalo de 50 mm/h a 70 mm/h por metro cuadrado. El promedio de los ensayos fue de 65 mm/h. En todos los casos se simularon aguaceros con una duración de treinta minutos. Los eventos de lluvia de treinta minutos de duración con intensidades de 50 mm/h a 70 mm/h tienen periodos de retorno de 15 a 100 años en Santander. Mientras, para el promedio de 65 mm/h el periodo de retorno en Santander es de 50 años. De los treinta minutos que duraba la simulación del aguacero mediante el aporte de escorrentía superficial y de lluvia directa, los primeros diez minutos se empleaban para asegurar el empape de la muestra, y los veinte minutos restantes correspondían a la primera parte del periodo de medición del agua infiltrada.

La medición del volumen de agua recogida en las seis cámaras con las que cuenta el ICF se realizaba durante los veinte minutos finales del aguacero simulado y durante diez minutos más una vez finalizada la simulación de escorrentía y lluvia. Estos diez minutos añadidos de medición permitían el escurrimiento del agua desde el pavimento a los recipientes de recogida. Por tanto, el periodo de medición era de treinta minutos, tras los cuales se pesaban las seis cámaras del ICF obteniendo el volumen de agua recogido en cada una, tanto en las cinco cámaras situadas bajo la muestra de pavimento permeable, como en la sexta cámara, encargada de la recogida de la escorrentía generada al final del pavimento permeable.

De este modo, cada una de las cuatro geometrías de adoquines fue ensayada en tres escenarios de colmatación combinados con cuatro inclinaciones, dando un total de cuarenta y ocho ensayos. Estos ensayos fueron repetidos dos veces para las dos geometrías que resultaron mejores en la primera serie, realizándose un total de setenta y dos mediciones.

En la segunda etapa de la investigación (Figura III-14), se introdujeron una serie de mejoras en la metodología del ensayo de resistencia a la colmatación:

- Análisis de la pendiente del 8% para completar la caracterización del pavimento permeable en función de la inclinación, ensayando cada escenario con cinco inclinaciones: 0%, 2%, 5%, 8% y 10%.
- Mejora de la calibración de los simuladores de esorrentía y de lluvia para disminuir la variación de la intensidad de precipitación fijada: las intensidades fueron ajustadas entre 45 mm/h y 55 mm/h, correspondientes a periodos de retorno de 10 y 20 años en Santander.
- Reducción del tiempo de medición a veinte minutos, eliminando los diez minutos de escurrimiento para analizar únicamente la capacidad de infiltración del pavimento permeable sin la componente de retención.
- Repetición del ensayo tres veces para cada combinación de escenario de colmatación e inclinación para minimizar la influencia de las variaciones específicas de un ensayo.

De este modo, el pavimento permeable de adoquines con ranuras fue ensayado en cinco escenarios de colmatación combinados con cinco inclinaciones, dando un total de veinticinco ensayos que, repetidos tres veces, resultan en setenta y cinco mediciones. Por su parte, cada una de las seis probetas de mezcla bituminosa porosa fue ensayada bajo dos de los tres escenarios de colmatación posibles, que combinados con las cinco inclinaciones hacen un total de sesenta ensayos, que con tres repeticiones, resultan en ciento ochenta mediciones.



Figura III-14. Ensayos de pavimentos permeables de adoquines con ranuras y de mezcla bituminosa porosa en el ICF.

III.2 ENSAYOS DE CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN CAMPO

III.2.1 PERMEÁMETRO LCS (LABORATORIO DE CAMINOS DE SANTANDER)

Se emplearon dos equipos portátiles para la medición de la capacidad de infiltración en campo de pavimentos urbanos: el permeámetro LCS (Laboratorio de Caminos de Santander) y el ICP (Infiltrómetro Cántabro Portátil).

El permeámetro LCS (Figura III-15) se detalla en la norma española NLT-327/00 (2000), y es similar al permeámetro de anillo descrito en la norma europea EN 12697-40 (2005). Este equipo portátil consta de un tubo de metacrilato que es colocado sobre la superficie a ensayar, apoyándose en una goma sellante oprimida por una masa tórica. Este tubo con desagüe inferior y tapón permite la liberación del agua contenida en su interior.

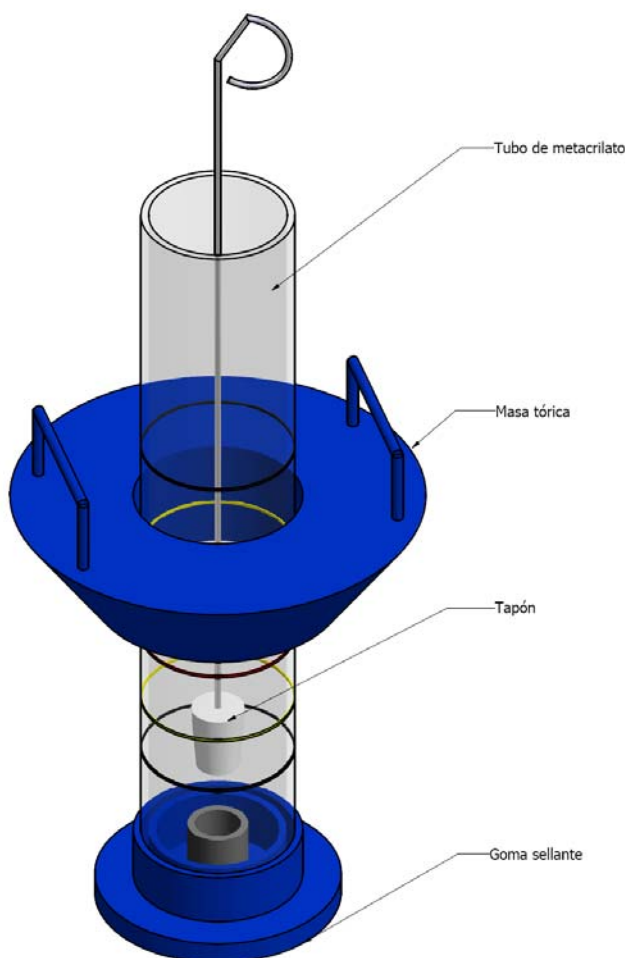


Figura III-15. Permeámetro del LCS (Laboratorio de Caminos de Santander).

El permeámetro LCS no necesitó ningún tipo de calibración previa ya que cuenta con las marcas necesarias para realizar la correspondiente medición del tiempo que tarda en infiltrarse el volumen de agua contenido entre ellas. La permeabilidad de la mezcla se considera pobre o deficiente cuando el tiempo medido está por encima de los doscientos segundos y apreciable cuando es menor de cien segundos. El resultado para una mezcla bituminosa porosa recién colocada debe ser inferior a cincuenta segundos, debiendo estar preferiblemente por debajo de los veinticinco o treinta y cinco segundos (Pérez y Calzada, 1990).

III.2.2 INFILTRÓMETRO CÁNTABRO PORTÁTIL (ICP)

El Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP) fue especialmente diseñado para este estudio y está formado por cuatro partes principales: cámara de inundación, simulador de lluvia, cámara de carga y recipiente de recarga (Figura III-16).

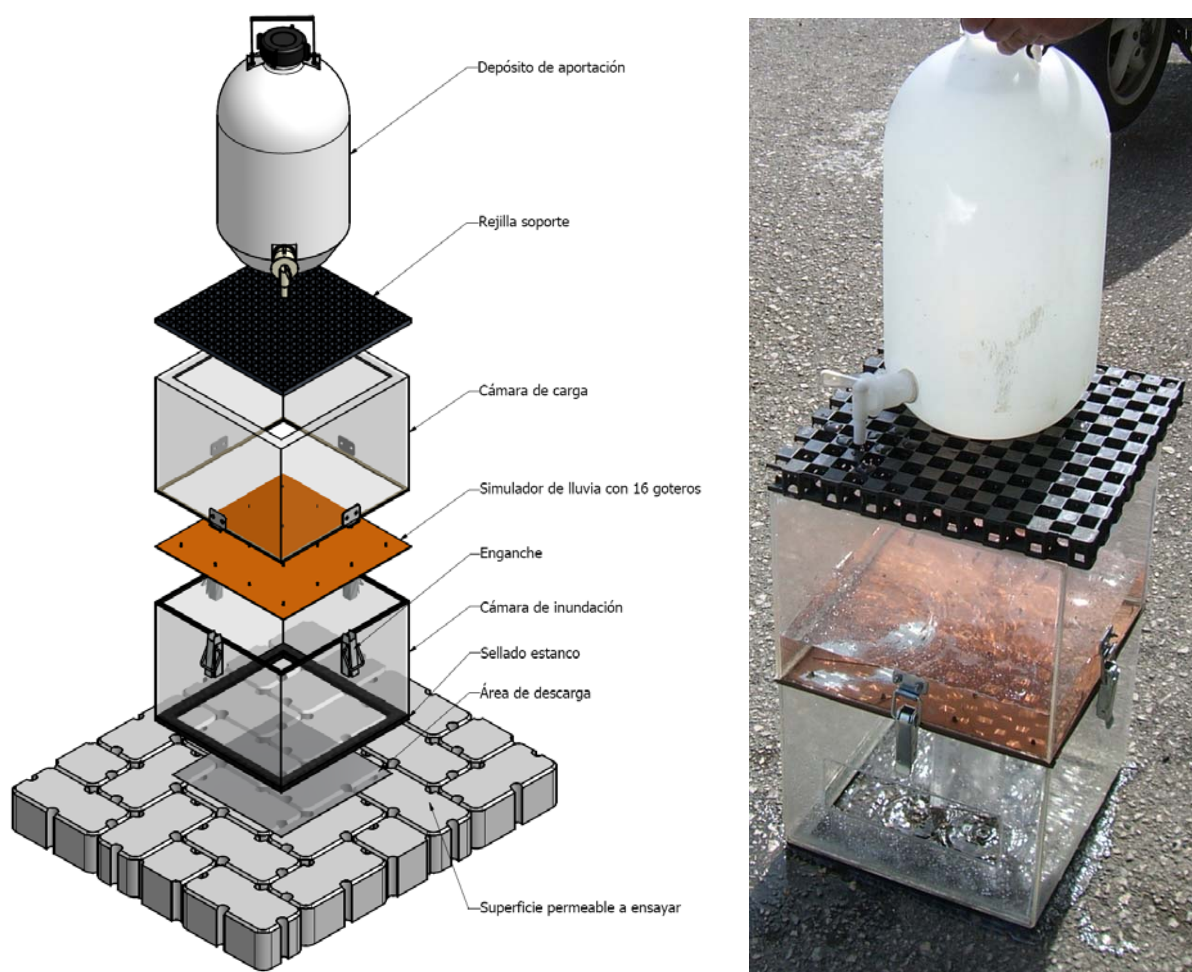


Figura III-16. Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP)

La cámara de inundación consiste en una caja de metacrilato transparente sin tapa y sin fondo colocada sobre la superficie. El objeto de esta cámara es retener lateralmente el agua que el pavimento no es capaz de infiltrar, permitiendo la medida directa del nivel de inundación después de un evento de lluvia simulado mediante una regla de precisión de 1 mm situada en su interior. Con este objetivo, el perímetro inferior de la cámara de inundación está recubierto con goma sellante. Además, para completar la acción sellante de la goma, durante el ensayo se utiliza vaselina a lo largo del perímetro del área ensayada en contacto con la cámara de inundación.

El simulador de lluvia es una placa de plástico con goteros de caudal fijo insertados en disposición rectangular. Esta placa se coloca entre las dos cámaras del ICP, quedando fijada al unir estas mediante los cuatro enganches dispuestos en los laterales. El simulador de lluvia permite fijar una determinada intensidad de precipitación en función del número de goteros y de la altura de agua en la cámara de carga.

La cámara de carga es similar a la cámara de inundación, se sitúa sobre esta y cuenta con una graduación vertical con una precisión de 1 mm. La función de esta cámara es albergar una altura constante de agua sobre el simulador de lluvia para producir la intensidad de precipitación fijada para el ensayo de capacidad de infiltración en campo.

El recipiente de recarga es colocado sobre una placa de apoyo situada sobre la cámara de carga. Su capacidad es de diez litros, permitiendo la recarga de la cámara superior con el agua necesaria para mantener constante a lo largo del experimento el nivel de carga y por tanto la intensidad de lluvia simulada. Este recipiente actúa además como pesa, reforzando el sellado inferior.

El simulador de lluvia del ICP necesitó de un estudio previo para conocer las distintas alturas de agua necesarias en la cámara de carga para producir las intensidades de lluvia específicas sobre las superficies ensayadas. Para cubrir un amplio rango de intensidades se emplearon dos simuladores de lluvia diferentes: uno con dieciséis goteros y otro con treinta y seis. Estos simuladores permitieron obtener rangos de intensidades de lluvia entre 37 y 190 mm/h y entre 150 y 520 mm/h, respectivamente (Figura III-17).

La calibración de los simuladores de lluvia del ICP se llevó a cabo en laboratorio siguiendo la misma metodología. Después de montar completamente el Infiltrómetro CP con el simulador de lluvia específico, la cámara de carga se llenaba hasta alcanzar la altura a tarar. Se mantenía el nivel del agua y se medía el volumen de agua precipitada en un minuto, repitiendo el proceso cuatro veces por cada altura. El procedimiento completo se repitió dos veces, resultando ocho valores de intensidad de lluvia por cada altura de agua en la cámara de

carga. Los datos resultantes fueron procesados obteniendo las relaciones entre la altura de agua en la cámara de carga y la intensidad de lluvia resultante sobre la superficie de ensayo (Figura III-17).

Para las ecuaciones de regresión lineal recogidas en la Figura III-17, “Y” es la intensidad de la precipitación (mm/hr) y “X” es la altura de la columna de agua en la cámara de carga (cm). Los valores del coeficiente de determinación R^2 son 0,96 para el simulador de lluvia con dieciséis goteros (Simulador 16), y 0,91 para el simulador de lluvia con treinta y seis goteros (Simulador 36).

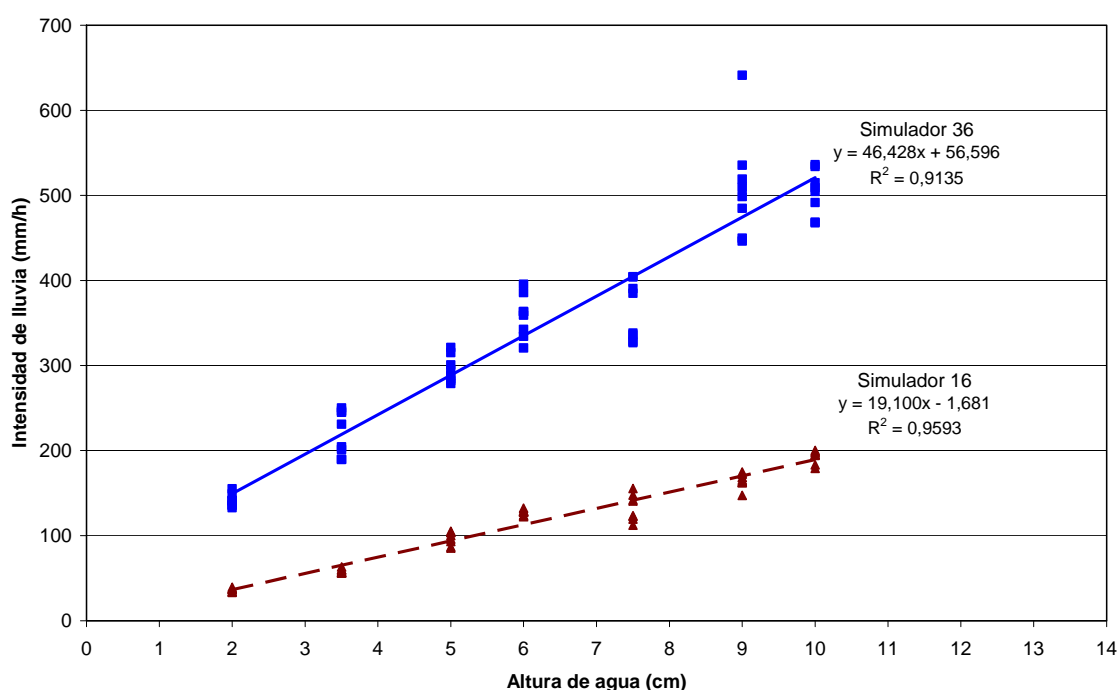


Figura III-17. Ajustes de la intensidad de lluvia simulada según el nivel de agua en la cámara de carga para los dos simuladores de lluvia empleados con el ICP.

Durante las calibraciones se observó que un mayor número de goteros significaba un aumento de la dispersión de la intensidad de lluvia generada sobre la superficie. Estas variaciones probablemente se deban a que al aumentar el número de goteros aumenta el riesgo de que alguno de ellos no funcione adecuadamente por la oclusión de burbujas de aire. Por tanto, se establece como condición necesaria durante los ensayos chequear cada poco tiempo el correcto funcionamiento de los goteros corrigiendo inmediatamente cualquier problema detectado.

III.2.3 PAVIMENTOS ENSAYADOS

Para el ensayo de la capacidad de infiltración en campo con el permeámetro LCS y con el ICP se seleccionaron varios pavimentos urbanos, permeables e impermeables, con inclinaciones entre 0% y 2%. La Tabla III-8 muestra la referencia de cada pavimento ensayado, su descripción, localización y año de construcción. Como se puede observar, fueron seleccionadas dos superficies de césped reforzado, tres superficies permeables y tres superficies impermeables. Las superficies de césped no se consideran inicialmente como permeables porque su capacidad de infiltración depende del sustrato de relleno de los refuerzos en el que se desarrolla el césped, pudiendo incluso resultar impermeables. Por su parte, las superficies permeables seleccionadas fueron dos mezclas bituminosas porosas con distintas condiciones de uso y una superficie de adoquines con ranuras. Además, se ensayaron como contraste tres superficies impermeables: dos superficies de mezcla bituminosa cerrada, con distinto estado de conservación, y una superficie de adoquines sellados con mortero.

Tabla III-8. Pavimentos urbanos ensayados con el permeámetro LCS y con el Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP) para evaluar su capacidad de infiltración.

Referencia	Descripción	Localización	Año de construcción
RG1	Césped con refuerzos de hormigón (relleno arcilloso)	ETSICCP, Santander	2005
RG2	Césped con refuerzos de plástico (relleno arenoso)	La Guía, Gijón	2005
A1	Mezcla bituminosa impermeable nueva (pocas semanas de antigüedad)	Las Llamas, Santander	2007
A2	Mezcla bituminosa impermeable (varios años de antigüedad)	ETSICCP, Santander	1997
PA1	Mezcla bituminosa porosa solicitada (carretera con tráfico pesado)	Carretera CA-231, Santander	2006
PA2	Mezcla bituminosa porosa poco solicitada (aparcamiento de ligeros)	La Guía, Gijón.	2005
B1	Pavimento impermeable de adoquines (sellado con mortero)	El Sardinero, Santander	2001
B2	Pavimento permeable de adoquines (sin recebo)	La Guía, Gijón.	2005

III.2.4 ENSAYO DE INFILTRACIÓN CON EL LCS

Los ensayos de infiltración con el permeámetro LCS se realizaron de acuerdo al procedimiento indicado en la norma NLT-327/00 (2000). Las etapas del procedimiento son:

1. Situar el permeámetro sobre el punto seleccionado y colocar la pesa.
2. Cerrar el orificio de salida con el tapón y llenar de agua el tubo de metacrilato.
3. Dejar vaciar el permeámetro completamente para saturar la superficie.
4. Tapar y llenar de nuevo de agua el tubo de metacrilato.
5. Dejar vaciar el permeámetro controlando el tiempo de paso del nivel del agua por las dos marcas de referencia.
6. Anotar el tiempo medido en segundos como resultado del ensayo.

Este procedimiento se realizó en tres puntos diferentes de cada una de las superficies ensayadas (Tabla III-8). Aparte de la goma situada en el contacto del aparato con la superficie, no se utilizó ningún otro sellante para asegurar la completa impermeabilización del perímetro del punto de ensayo. Con superficies impermeables, el tiempo de espera para medir el descenso del agua entre marcas se limitó a media hora (1800 s), considerando la superficie como completamente impermeable por encima de este tiempo de medida. Para las superficies de césped reforzado, el punto ensayado se situó sobre el césped y no sobre el refuerzo (Figura III-18). Mientras, para las superficies de adoquines, el punto de ensayo con el permeámetro LCS fue situado sobre la confluencia de tres juntas de adoquines (Figura III-18).



Figura III-18. Situación de los puntos ensayados con el permeámetro LCS en el caso de superficies de césped reforzado y adoquines con ranuras.

III.2.5 ENSAYO DE INFILTRACIÓN CON EL ICP

En el ensayo de infiltración con el ICP (Infitrómetro Cántabro Portátil) se mide la altura de inundación sobre el pavimento ensayado sometido a una precipitación simulada. Esta precipitación tiene una duración e intensidad correspondientes a un periodo de retorno fijado. Para la comparación de los pavimentos ensayados la duración del aguacero se fijó en cinco minutos y se simularon las intensidades correspondientes a los periodos de retorno de 10, 50 y 500 años. De este modo, comparando las diferentes alturas de inundación resultantes se puede valorar la capacidad de infiltración de cada pavimento.

El procedimiento de ensayo de la capacidad de infiltración propuesto con el ICP consta de las siguientes etapas:

1. Determinar las tres intensidades de lluvia a simular de acuerdo a la localización geográfica del pavimento ensayado y los periodos de retorno seleccionados.
2. Situar la cámara de inundación sobre el área de ensayo, sellando el perímetro con vaselina y colocando una carga sobre ella.
3. Verter directamente en el interior de la cámara de inundación al menos tres litros de agua para comprobar el sellado del perímetro.
4. Dejar infiltrar el agua para saturar la superficie, si es permeable, o extraer el agua manualmente con esponjas, si es impermeable.
5. Colocar el simulador de lluvia correspondiente a la intensidad de precipitación a simular y la cámara de carga con la altura de agua necesaria.
6. Mantener constante la altura de agua en la cámara de carga durante los cinco minutos del ensayo añadiendo agua desde el recipiente de recarga.
7. Anotar como resultado la altura del nivel de agua en el interior de la cámara de inundación al cabo de los cinco minutos de ensayo.
8. Repetir el procedimiento desde el quinto paso para la siguiente intensidad de lluvia hasta completar las tres marcadas.

Este procedimiento fue llevado a cabo en tres áreas cuadradas de 25 cm de lado para cada una de los pavimentos ensayados (Tabla III-8). Como ejemplo, en la Figura III-19 se muestra la localización de las tres áreas de ensayo para el caso del pavimento de mezcla bituminosa porosa en una carretera de alta intensidad de tráfico (PA1 de la Tabla III-8). En todos los casos, las áreas ensayadas con el ICP incluían en su interior el punto ensayado con el permeámetro LCS para permitir la posterior discusión de los resultados.

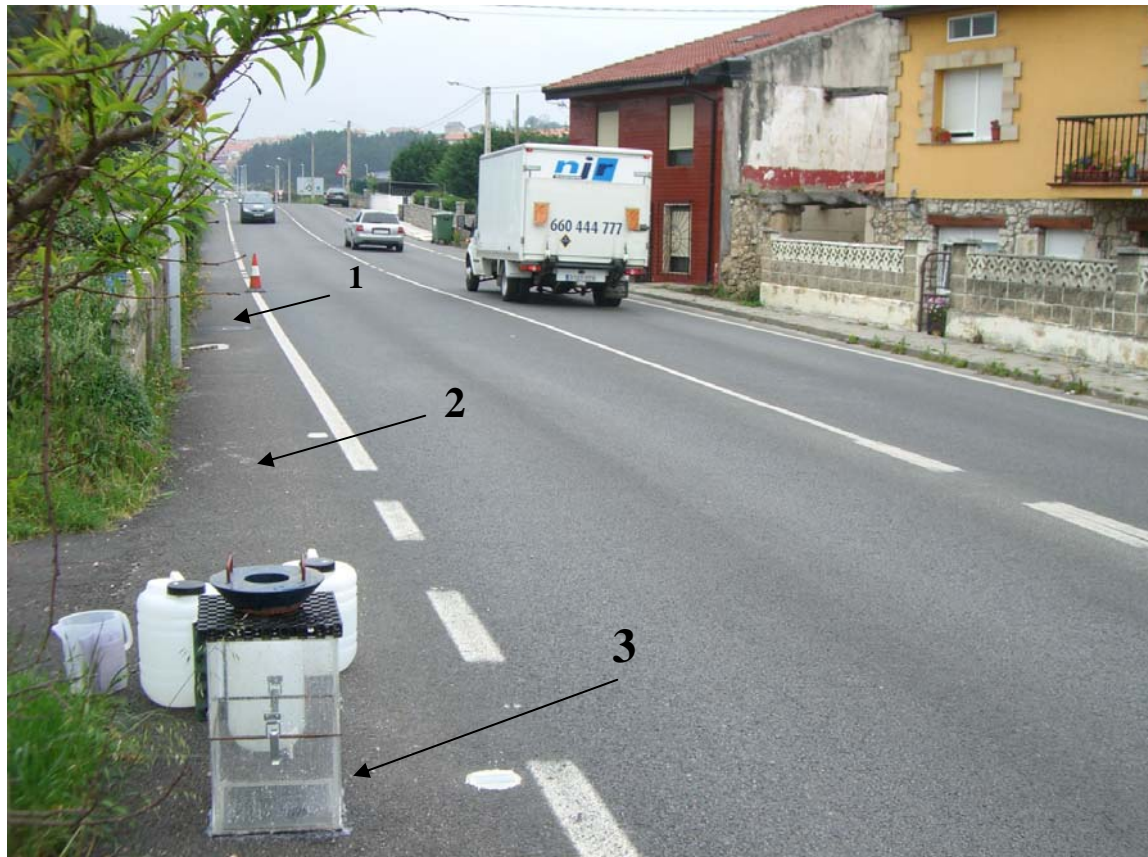


Figura III-19. Situación de las tres áreas de ensayo con el ICP en la carretera CA-231, Santander.

Las tres intensidades de lluvia del ensayo dependen del régimen de precipitaciones de la localización geográfica de la superficie a diagnosticar. Por tanto, los resultados obtenidos con el ICP no son directamente comparables entre sí, salvo cuando los pavimentos a comparar están localizados en una misma zona geográfica o cuando las intensidades de lluvia simuladas resultan similares. En este caso, todos los pavimentos ensayados (Tabla III-8) están localizados en dos áreas urbanas del norte de España: Santander y Gijón.

La Figura III-20 muestra las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Santander y Gijón (esta información meteorológica ha sido facilitada por la Agencia Estatal de Meteorología, antiguo Instituto Nacional de Meteorología, del Ministerio de Medio Ambiente con la autorización para reproducirla 390050781, estando prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio a partir de esta tesis). Obviando las diferencias en la escala de los ejes verticales, se puede constatar que los regímenes de precipitaciones son similares, si bien ligeramente inferiores en Gijón que en Santander. Con todo, la duración de cinco minutos del ensayo es demasiado corta para extraer las correspondientes intensidades de lluvia de los gráficos, por lo que fue necesario un cálculo más exacto de dichos valores.

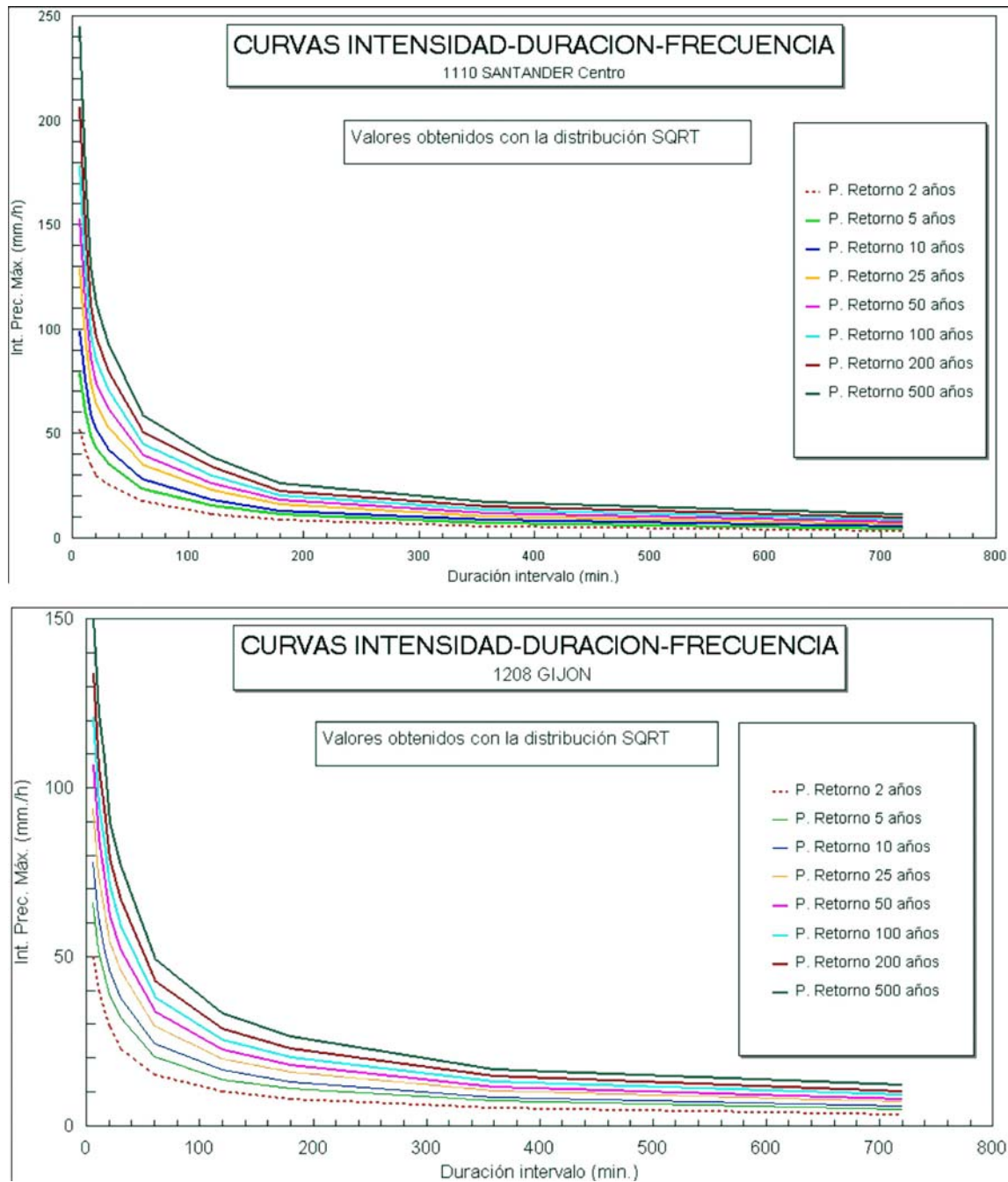


Figura III-20. Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para Santander y Gijón (AEMET).

Las tres intensidades de lluvia a simular, correspondientes a aguaceros de cinco minutos de duración y periodos de retorno de 10, 50 y 500 años, fueron obtenidas finalmente según el método especificado en la Instrucción Española de Drenaje Superficial (Dirección General de Carreteras, 1990), tomando los datos necesarios de la publicación de Máximas Intensidades de Lluvia Diarias (Dirección General de Carreteras, 1999). Los valores resultantes quedan recogidos en la Tabla III-9, tanto para Santander como para Gijón.

Tabla III-9. Intensidades de lluvia tomadas como referencia para el ensayo con el ICP correspondientes a aguaceros de cinco minutos de duración con periodos de retorno de 10, 50 y 500 años en Santander y Gijón.

Localización	Periodo de retorno		
	T=10 años	T=50 años	T=500 años
Santander	109,50	152,61	224,84
Gijón	92,03	126,98	182,90

En todos los casos las intensidades de lluvia con periodo de retorno de 10 y 50 años fueron simuladas con el Infiltrómetro CP 16 y las de periodo de retorno 500 años con el Infiltrómetro CP 36, ajustando las correspondientes alturas en la cámara de carga de acuerdo con los resultados de la calibración recogidos en la Figura III-17.

Para la calibración del ensayo se midieron las alturas de inundación resultantes sobre una placa metálica, completamente plana e impermeable. Los promedios de las tres medidas realizadas para cada uno de los tres periodos de retorno se recogen en la Tabla III-10. Estos valores serán tomados como referencia de impermeabilidad en el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de capacidad de infiltración en campo con el ICP.

Tabla III-10. Alturas de inundación medidas con el ICP sobre una placa metálica.

Localización	Parámetro	Periodo de retorno		
		T=10 años	T=50 años	T=500 años
Santander	Altura de inundación medida sobre una placa metálica (cm)	2,3	2,7	3,6

III.3 ENSAYOS DE RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POROSAS A LOS VERTIDOS DE HIDROCARBUROS

III.3.1 MATERIALES Y DOSIFICACIÓN

Para el estudio de la resistencia a los vertidos de hidrocarburos de las mezclas bituminosas porosas, se seleccionó una mezcla en caliente tipo PA-12 (PG-3, 2007), fabricada con tres tipos de betún:

- Betún convencional: B 60/70.
- Betún modificado con polímeros: BM-3b.
- Betún anticarburante: BAC.

El betún B 60/70 fue recomendado para la fabricación de mezclas bituminosas porosas por el MOPU (1987). Además, en esta publicación se indicaba la posibilidad de emplear betunes mejorados con la incorporación de elastómeros, dado que permiten obtener una mayor resistencia al desgaste de las mezclas porosas resultantes. Así, actualmente, el betún más empleado en la fabricación de mezclas bituminosas porosas en España es el betún modificado BM-3b. Por su parte, el betún anticarburante BAC, si bien no se emplea en la fabricación de mezclas porosas, cumple las especificaciones propias de un betún BM-2, por lo cual es poco susceptible a la temperatura y al envejecimiento, muy resistente a temperaturas elevadas de servicio y tiene un fácil manejo y puesta en obra (Páez Dueñas, 2005). Estas condiciones lo hacen apto para su empleo en aglomerados porosos.

La dosificación de los tres tipos de betún fue en todos los casos la misma, para permitir la comparación directa de los resultados obtenidos de los ensayos. El porcentaje de betún tomado como referencia fue el 4,5% sobre árido, coincidente con el mínimo indicado en el PG-3 (2007) para este tipo de mezclas. Las temperaturas de fabricación, necesarias para conseguir las viscosidades adecuadas que permitiesen la mezcla de los áridos y el betún con una correcta envoltura, fueron de 160 °C para el caso del betún B 60/70, 180 °C para el BM-3b, y 155 °C para el betún anticarburante BAC.

Respecto a los áridos de las mezclas, se empleó siempre el mismo material: ofita de densidad 2746 kg/m³, valor obtenido según la NLT-167/96 (1996). Los tamaños procedentes de cantera, 12/18 y 6/12 de Rigoitia y 0/6 de Haro, se tamizaron en seis fracciones para el ajuste exacto de la granulometría de cada probeta. El filler fue 100% de aportación, utilizándose cemento puzolánico en todos los casos.

Para la fabricación de las probetas Marshall se emplearon dos ajustes granulométricos

dentro del huso indicado para mezclas drenantes en caliente tipo PA 12 en el PG-3 (2007): el ajuste 1, correspondiente al centro del huso, y el ajuste 2, corregido ligeramente para aumentar el contenido de huecos de la mezcla. Ambos ajustes quedan recogidos en la Tabla III-11.

En total se fabricaron 276 probetas Marshall para el análisis de la resistencia a los vertidos de hidrocarburos de este tipo de mezclas: 101 probetas con el betún B 60/70, 92 con el BM-3b y 83 con el BAC. El ajuste granulométrico 1 se empleó en las 34 primeras probetas fabricadas con el betún B 60/70 y el ajuste granulométrico 2, corregido para aumentar los huecos, en las 242 probetas restantes, fabricadas con los tres betunes objeto de estudio.



Figura III-21. Almacenamiento de los áridos ofíticos empleados para la fabricación de mezcla bituminosa porosa en seis fracciones de tamaños: 20/12,5; 12,5/8; 8/4; 4/2; 2/0,5 y 0,5/0,063 mm.

Tabla III-11. Granulometrías empleadas para la fabricación con distintos betunes de las probetas Marshall de mezcla bituminosa porosa para los ensayos de resistencia a los vertidos de hidrocarburos.

Granulometría PA-12	Cernido acumulado para los correspondientes tamices UNE (mm)						
	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
Huso superior	100	100	62	27	20	12	6
Ajuste 1 (centro del huso)	100	85	50	14	9	5	3
Ajuste 2	100	85	50	14	11	7,5	4
Huso inferior	100	70	38	13	9	5	3

III.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS

Todos los valores de caracterización de cada probeta de las distintas mezclas bituminosas porosas ensayadas están convenientemente recogidos en el *Anexo 4: Resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos*.

De cada mezcla resultante del empleo de los tres tipos de betún objeto de análisis, se estudiaron las tres características fundamentales de las mezclas bituminosas porosas según Pérez y Calzada (1990): porcentaje de huecos, permeabilidad y pérdida por desgaste. Las dos primeras variables, porcentaje de huecos y permeabilidad, fueron medidas en las 276 probetas fabricadas. Sin embargo, la pérdida por desgaste, dado el carácter destructivo del ensayo, se midió únicamente en 36 probetas control: 12 probetas fabricadas con cada tipo de betún. Las metodologías de caracterización empleadas fueron:

- Porcentaje de huecos: medido de forma geométrica según la NLT-168/90 (1990).
- Permeabilidad: evaluada mediante un permeámetro de carga variable (Figura III-22).
- Pérdida por desgaste: medida utilizando el ensayo cántabro de pérdida por desgaste recogido en la NLT-352/00 (2000).

El porcentaje de huecos se determinó mediante el cálculo de la densidad relativa de la mezcla y los correspondientes volúmenes de áridos y betún. La densidad relativa de la mezcla se obtuvo pesando las probetas con precisión de décima de gramo y midiendo su altura en tres puntos con un calibre de precisión centésima de milímetro. Los volúmenes relativos de áridos y betún se obtuvieron a partir de sus porcentajes y densidades.

Para la medida de la permeabilidad, se empleó el mismo permeámetro de carga variable usado por Calzada (1984) y Pérez Jiménez *et al.* (1985), eliminando la etapa de extracción del aire ocluido. Así, el ensayo realizado abarcó tres etapas: saturación de la probeta, colocación en el permeámetro y medición del tiempo entre marcas. La saturación consistió en cinco minutos de inmersión en agua, durante los cuales los huecos de la probeta se llenaban de agua, eliminando la mayor parte del aire contenido en los mismos. Posteriormente, la probeta Marshall se colocaba en el interior de un molde de Proctor Normal, sellando con vaselina las juntas para evitar las fugas de agua. Sobre dicho molde se colocaba el tubo de metacrilado (Figura III-22). Por último, se sometía a la probeta a una columna de agua variable contenida en dicho tubo, midiendo el tiempo transcurrido entre el paso del nivel del agua por dos marcas fijas. La permeabilidad resultante se obtenía introduciendo el tiempo medido en la correspondiente ecuación del permeámetro de carga variable (Pérez Jiménez *et al.*, 1985).

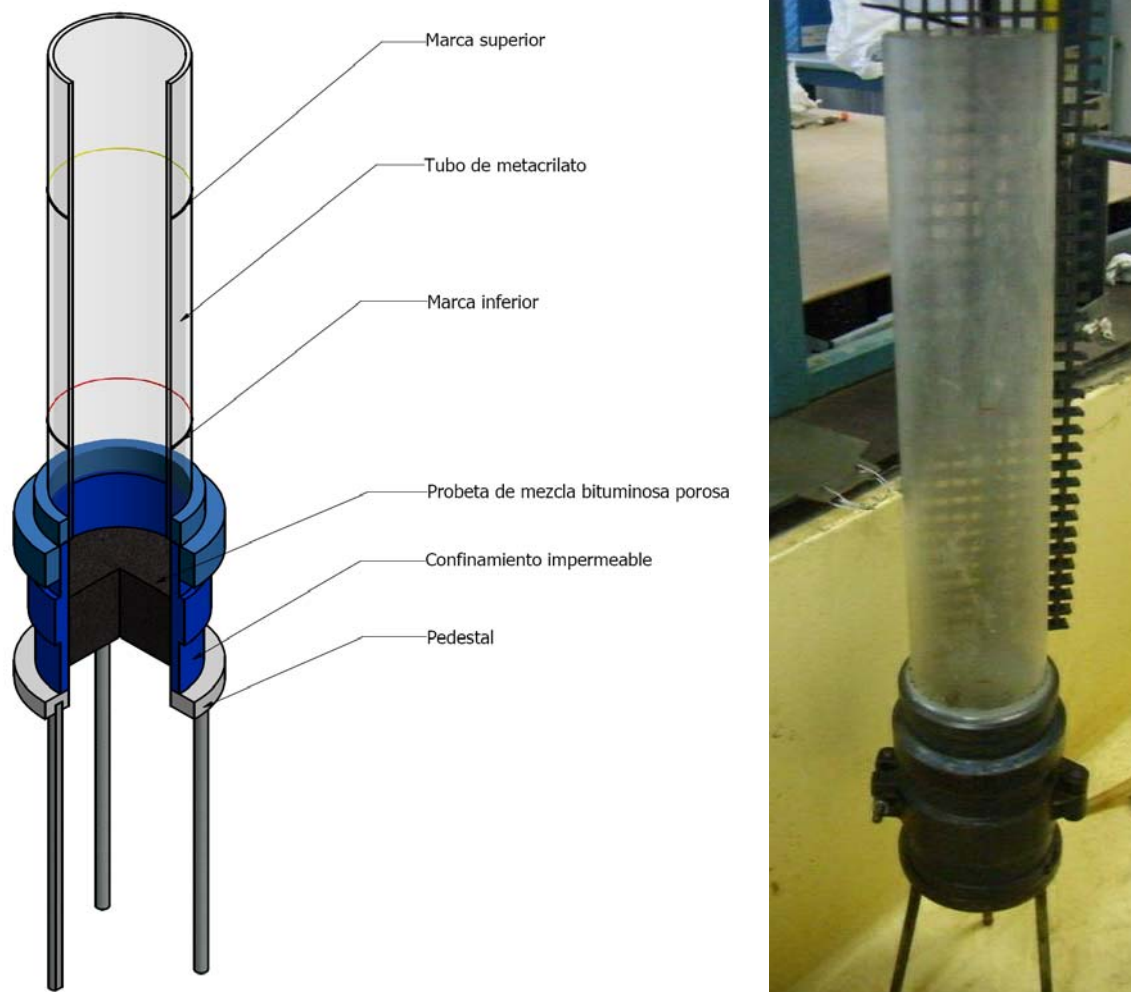


Figura III-22. Permeámetro de carga variable utilizado en el laboratorio para la determinación de la permeabilidad de las probetas de mezcla bituminosa porosa.

Respecto a los ensayos de pérdida por desgaste, estos se realizaron siguiendo la norma NLT-352/00 (2000), utilizando la máquina de desgaste de los Ángeles sin carga abrasiva (Figura III-23). Dado que al aumentar la temperatura del ensayo cántabro, dentro del rango de 12 °C a 25 °C, disminuye la pérdida por abrasión de una mezcla porosa fabricada con betún B 60/70 (Calzada, 1984), se puede considerar que cualquier ensayo realizado a una temperatura menor de 25°C ofrecerá resultados de desgaste mayores que a esta temperatura, siendo por tanto conservadores a la hora de comparar con los límites fijados por el PG-3 a dicha temperatura (2007). Además, existen experiencias previas como por ejemplo la investigación realizada por Poulidakos *et al.* (2003), en las que se comparan mezclas bituminosas porosas empleando el ensayo cántabro a 20 °C. Por tanto, para obtener valores de desgaste del lado de la seguridad y por facilidad de procedimiento en ese momento, las experiencias se realizaron a 20 °C.



Figura III-23. Máquina de los Ángeles empleada en el ensayo cántabro y distintos desgastes resultantes en probetas Marshall de mezcla bituminosa porosa.

Respecto a las características exigibles, Pérez Jiménez *et al.* (1982) señalan:

- Porcentaje de huecos: mayor del 14%, siendo deseable por encima del 18%.
- Permeabilidad: mayor de $0,1 \cdot 10^{-2}$ cm/s, siendo deseable mayor de $1 \cdot 10^{-2}$ cm/s.
- Pérdida por desgaste: menor del 35%, siendo deseable por debajo del 30%.

Estas limitaciones iniciales estaban pensadas únicamente para ligantes convencionales por lo que el MOPU (1987) aumenta el porcentaje de huecos y la permeabilidad exigidos a las mezclas porosas, y ajusta los valores de desgaste a la temperatura de realización del ensayo:

- Porcentaje de huecos: mayor de 16%, siendo aconsejable mayor de 18%.
- Permeabilidad: mayor de $1 \cdot 10^{-2}$ cm/s, siendo aconsejable mayor de $5 \cdot 10^{-2}$ cm/s.

- Pérdida por desgaste:
 - Menor de 30-35% si el ensayo se realiza a 18 ± 1 °C.
 - Menor de 20-25% si el ensayo se realiza a 25 ± 1 °C.

Actualmente, el PG-3 (2007) indica un porcentaje de huecos mínimo del 20%, no hace mención a la permeabilidad y exige un máximo desgaste a 25°C de 20% ó 25%, según la categoría de tráfico pesado de la carretera a construir sea mayor o menor que la T1.

Las variables porcentaje de huecos y permeabilidad, medidas en las 276 probetas fabricadas, presentan unos promedios generales de 20,3% de huecos y $26 \cdot 10^{-2}$ cm/s de permeabilidad. Mientras, la variable desgaste, medida en las 36 probetas control, tiene un valor promedio de 17,8% a 20°C. Por tanto, los valores promedio de las variables de caracterización cumplen con los valores de referencia para mezclas bituminosas porosas.

Respecto a la variable porcentaje de huecos, considerando las 101 probetas fabricadas con el betún B 60/70 (34 probetas con el ajuste granulométrico 1 y 67 probetas con el ajuste granulométrico 2), las 92 probetas con el BM-3b y las 83 probetas con el BAC, los correspondientes valores promedios fueron:

- 19,7% de huecos con el B 60/70.
 - 19,0% de huecos con el ajuste granulométrico 1.
 - 20,1% de huecos con el ajuste granulométrico 2.
- 20,3% de huecos con el BM-3b.
- 21,0 de huecos con el BAC.

En la Figura III-24 se representa el diagrama de cajas y bigotes correspondiente al porcentaje de huecos para cada tipo de mezcla fabricada.

En los diagramas de cajas y bigotes, las cajas están delimitadas por los cuartiles inferior (Q1 o cuartil del 25%) y superior (Q3 o cuartil del 75%). En el interior de las cajas se encuentra la mediana, valor de la variable que deja el mismo número de datos por encima y por debajo de él (50%). Por su parte, los bigotes están delimitados por un valor máximo y un valor mínimo, abarcando aproximadamente el 95% de los valores registrados. Quedan fuera de las cajas y de los bigotes los valores atípicos. Estos datos atípicos pueden ser:

- Leves: cuando están situados entre 1,5 y 3 veces el rango intercuartil (Q3-Q1) respecto a los límites de las cajas (Q1 o Q3).
- Extremos: cuando están situados a más de 3 veces el rango intercuartil (Q3-Q1) respecto a los límites de las cajas (Q1 o Q3).

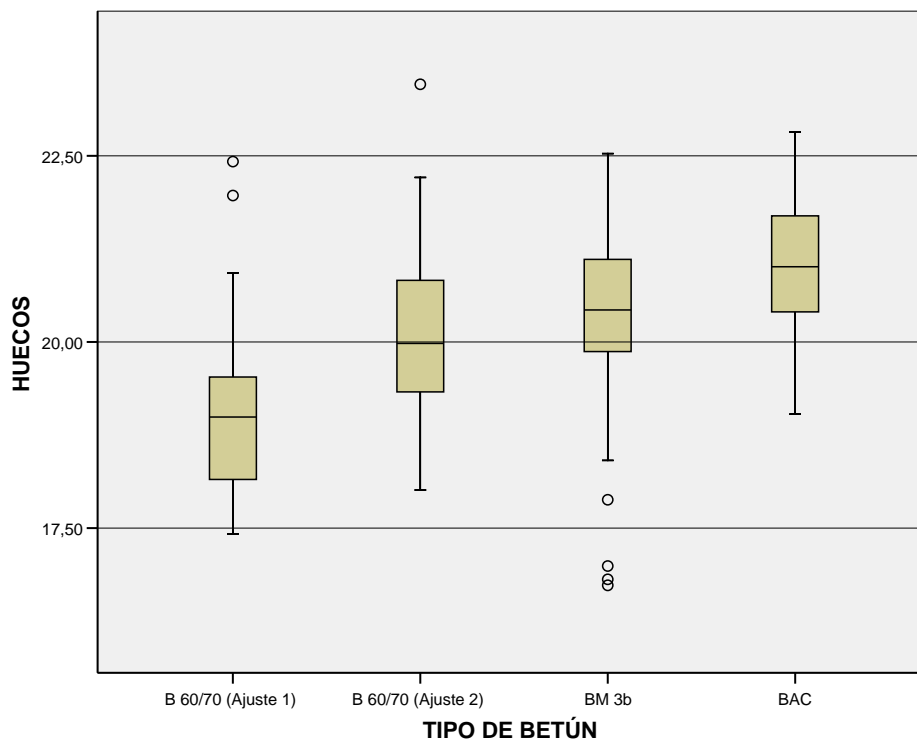


Figura III-24. Diagrama de cajas de la variable porcentaje de huecos medida en todas las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún.

En la Figura III-24 se observa como el betún B 60/70 presenta porcentajes de huecos menores con el ajuste granulométrico 1 que con el ajuste granulométrico 2. Queda de este modo patente la mejora lograda en el porcentaje de huecos con el cambio de granulometría. Con las dos granulometrías la distribución de los valores del porcentaje de huecos presenta ligeras asimetrías, hacia el máximo en el caso del ajuste 1 y hacia el mínimo con el ajuste 2. Además, se detectan tres valores atípicos leves por encima del máximo en las mezclas fabricadas con el betún B 60/70: dos con el ajuste granulométrico 1 y uno con el ajuste granulométrico 2. Mientras, con el betún BM-3b se detectaron cuatro valores atípicos leves por debajo del mínimo y con el betún BAC ninguno. Al no ser extremos, estos valores atípicos no supusieron la eliminación de las correspondientes probetas del análisis.

La variable huecos es normal, cumpliendo la prueba de Kolgomorov-Smirnov con un nivel de significancia del 95%, lo cual permite la comparación de las medias mediante la prueba T para muestras independientes. Con esta prueba se detectan diferencias significativas entre las mezclas obtenidas con los tres tipos de betún estudiados. Sin embargo, si en la comparación de medias se consideran únicamente las probetas fabricadas con el betún B 60/70 y el ajuste granulométrico 2, desaparecen las diferencias entre el B 60/70 y el BM-3b, ofreciendo ambos tipos de betún prácticamente el mismo porcentaje de huecos.

Respecto a la variable permeabilidad, considerando las mismas probetas de cada tipo de mezcla, los correspondientes valores promedios obtenidos fueron:

- $23,5 \cdot 10^{-2}$ cm/s de permeabilidad con el B 60/70.
 - $13,2 \cdot 10^{-2}$ cm/s de permeabilidad con el ajuste granulométrico 1.
 - $29,1 \cdot 10^{-2}$ cm/s de permeabilidad con el ajuste granulométrico 2.
- $27,7 \cdot 10^{-2}$ cm/s de permeabilidad con el BM-3b.
- $28,8 \cdot 10^{-2}$ cm/s de permeabilidad con el BAC.

En la Figura III-25 se representa el diagrama de cajas de la permeabilidad de cada tipo de mezcla. Las distribuciones son simétricas en todos los casos y no se detectan valores atípicos, si bien se observa una mayor variabilidad con el betún B 60/70 y el ajuste granulométrico 2. La variable permeabilidad tiene distribución normal con un nivel de significancia del 95%. Así, comparando las medias de permeabilidad mediante la prueba T se detectan diferencias significativas, pudiendo agruparse los valores en dos grupos: uno formado por las probetas fabricadas con el betún B 60/70 y el otro formado por los betunes modificados BM-3b y BAC. Sin embargo, si se consideran únicamente las probetas B 60/70 fabricadas con el ajuste granulométrico 2 desaparecen las diferencias significativas del B 60/70 respecto al resto, presentando los tres tipos de mezcla prácticamente la misma permeabilidad.

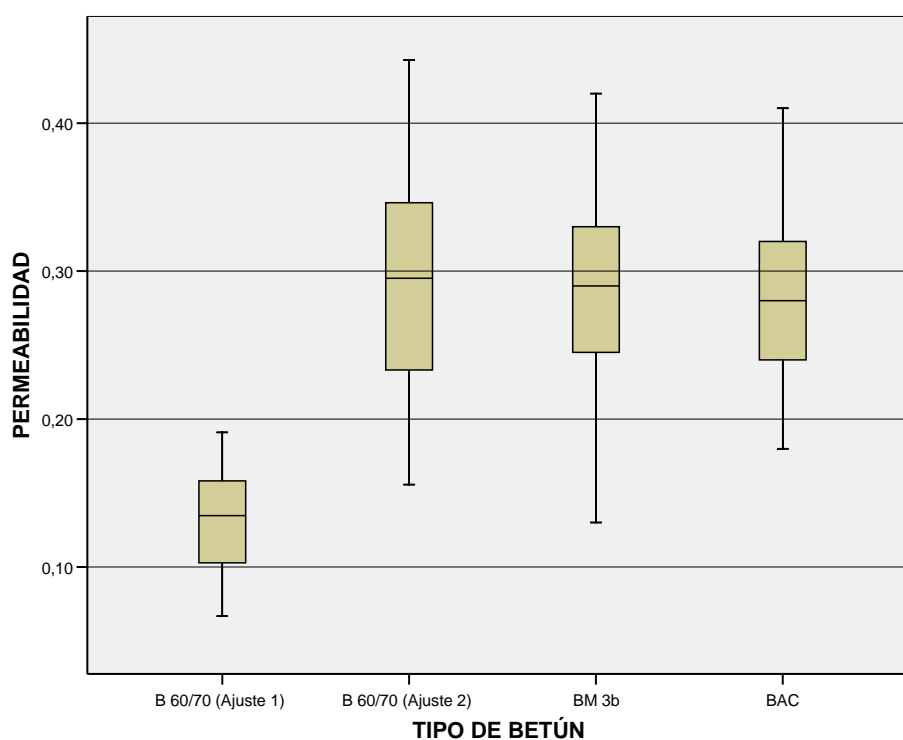


Figura III-25. Diagrama de cajas de la variable permeabilidad medida en todas las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún.

Por último, respecto a la variable desgaste, los correspondientes valores promedio obtenidos de las 12 probetas control fabricadas con cada tipo de betún, se presentan en la Tabla III-12, con los valores asociados de porcentaje de huecos y permeabilidad.

Tabla III-12. Promedios de las variables huecos, permeabilidad y desgaste de las probetas control de mezcla bituminosa porosa fabricada con cada tipo de betún.

Betún	Granulometría	Nº control	Huecos	Permeabilidad	Desgaste
B 60/70	Ajuste 1	4	18,1%	$13,2 \cdot 10^{-2}$ cm/s	13,4%
B 60/70	Ajuste 2	8	20,3%	$32,5 \cdot 10^{-2}$ cm/s	25,0%
B 60/70	Ajuste 1 y 2	12	19,5%	$26,1 \cdot 10^{-2}$ cm/s	21,1%
BM-3b	Ajuste 2	12 (11)	20,7%	$28,3 \cdot 10^{-2}$ cm/s	12,2% (9,6%)
BAC	Ajuste 2	12	20,5%	$25,4 \cdot 10^{-2}$ cm/s	20,0%

La Figura III-26 se presenta el diagrama de cajas y bigotes correspondiente a la variable desgaste.

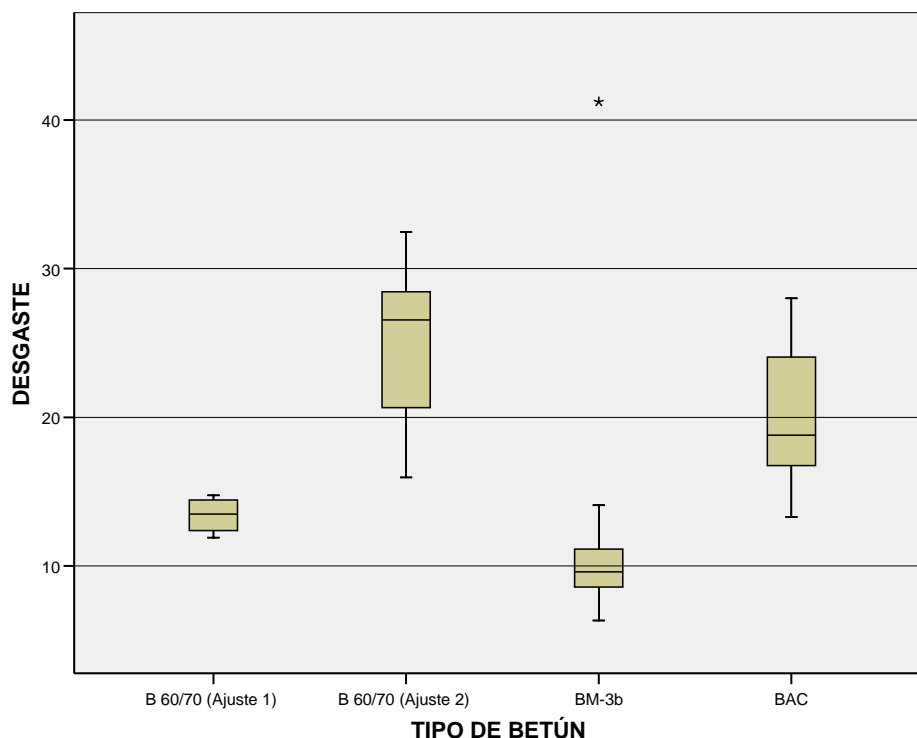


Figura III-26. Diagrama de cajas de la variable desgaste medida en las probetas control de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún.

En la Figura III-26 se observa un único valor atípico correspondiente a la mezcla bituminosa porosa fabricada con el betún BM-3b. Este valor es extremo y corresponde a un desgaste de más del 40%. Eliminando este valor extremo, probablemente debido a un error en la fabricación de la probeta, el promedio del desgaste pasa del valor de 12,2% a un valor de 9,6% (Tabla III-12). Este valor corregido será el que se tome como referencia en el análisis de los resultados de los ensayos de resistencia al vertido de hidrocarburos de la mezcla bituminosa porosa fabricada con el betún BM-3b.

Analizando los 36 valores disponibles de desgaste se comprobó que presentaban una distribución normal cumpliendo la prueba de Kolgomorov-Smirnov con un nivel de significancia del 95%. Así, comparando las medias, se encontraron diferencias significativas entre las mezclas porosas fabricadas con los betunes B 60/70 y BM-3b, y entre las mezclas fabricadas con BM-3b y BAC. Sin embargo, no se encontraron entre las fabricadas con los betunes B 60/70 y BAC, que muestran valores de desgaste semejantes.

Por último, señalar que se detectaron correlaciones entre las distintas variables, pudiendo plantearse ajustes lineales de la permeabilidad y del desgaste en función de los huecos con coeficientes de determinación R^2 máximos de 0,7 y 0,6 para el betún B 60/70. Estos ajustes únicamente sirven para mostrar la tendencia de aumento de la permeabilidad y del desgaste con el porcentaje de huecos, sin que esta variable llegue a explicar totalmente los valores de permeabilidad y desgaste obtenidos (ver último apartado del *Anexo 4: Resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos*).

Respecto a la dispersión de las medidas, tal y como se ha comentado en el estado del arte, las mezclas bituminosas porosas han presentado este problema en otros estudios, dificultando su análisis experimental. Este problema puede deberse a que el aglomerado poroso es un material compuesto y discontinuo sujeto a múltiples factores de influencia. Para cada probeta fabricada, algunos de estos factores pueden ser: el ajuste de la granulometría de los áridos, la dosificación del betún, el amasado manual, la temperatura de compactación y la manipulación una vez desmoldadas. Estas variables se vieron multiplicadas por tres al emplear tres tipos de betún diferentes, con diferentes temperaturas de fabricación. En conclusión, y como representación de esta variabilidad queda justificado el mantener dentro del análisis experimental las probetas correspondientes a los valores atípicos leves detectados en la variable porcentaje de huecos en mezcla (7 de 276).

III.3.3 TIPO DE VERTIDO SIMULADO

Dado que el principal uso de pavimentos permeables corresponde a aparcamientos, donde el principal vertido de hidrocarburos es de aceite usado de motor, los estudios se centraron en la resistencia frente a derrames de aceite, si bien se realizaron algunas comprobaciones con gasolina y gasoil, vertidos más propios de áreas de servicio.

A la hora de proponer nuevas metodologías de ensayos de resistencia al vertido de hidrocarburos para mezclas bituminosas porosas, se probó previamente el ensayo de inmersión completa. Tras los tanteos realizados se llegó a la conclusión de que esta metodología de ensayo no era adecuada para este estudio por tres razones:

- Imposibilidad de realización del ensayo con aceites usados de motor, debido a la alta viscosidad de estos, la cual provoca un aumento de la masa de las probetas de mezcla bituminosa porosa en vez de una pérdida de la misma, al quedar atrapados en el interior de la mezcla.
- Excesiva afección estructural por parte de los combustibles a las mezclas bituminosas porosas, aún con concentraciones bajas en agua, hasta el punto de imposibilitar su manejo y cualquier tipo de medición (Figura III-27).
- Falta de representatividad respecto a la realidad, ya que una mezcla bituminosa porosa, utilizada en un firme permeable, nunca va a estar sometida a la inmersión completa en ningún tipo de lubricante o combustible, dado su carácter drenante y la acción de lavado de las lluvias.



Figura III-27. Ensayo de inmersión completa de probetas de mezcla bituminosa porosa en agua con hidrocarburos.

Por tanto, se decidió buscar una simulación de vertido más versátil y ajustado a la realidad. El tipo de vertido seleccionado fue el goteo de una determinada cantidad de hidrocarburo sobre la probeta, acompañado de una simulación de lluvia con agua destilada para producir el correspondiente lavado.

Respecto a la cantidad fija de hidrocarburo, se tomaron como referencia las cantidades vertidas por los cuentagotas disponibles y las investigaciones previas sobre retención y biodegradación de hidrocarburos en el interior de firmes permeables (Pratt *et al.*, 1999; Bond *et al.*, 1999; Coupe *et al.*, 2003; Bayón *et al.*, 2005). Así, la cantidad de hidrocarburos depositada en las superficies urbanas, derivada de las concentraciones encontradas en la escorrentía superficial, tiene un valor medio de 178 mg/m²/semana (Pratt *et al.*, 1999). Dado que la superficie plana de las probetas Marshall es de 81 cm², se puede calcular que el vertido teórico correspondiente es 6,18 mg/mes. Al realizar los vertidos siempre con goteros con un promedio de 22,6 mg/gota de hidrocarburo, se pueden clasificar los niveles de vertido simulados en las cinco categorías recogidas en la Tabla III-13, con su correspondiente equivalencia en tiempo.

Tabla III-13. Niveles de vertido de hidrocarburos ensayados sobre mezclas bituminosas porosas.

Vertido	Cantidad total de hidrocarburo		Equivalencia en tiempo (meses)
	(gotas)	(mg)	
Nivel 0	0	0	0
Nivel 1	12	271,1	43,8
Nivel 2	36	813,6	131,6
Nivel 3	60	1356,0	219,4
Nivel 4	84	1898,4	307,2
Nivel 5	108	2440,8	395,0

La simulación de lluvia consistió en la aportación de 824 ml de agua destilada para el lavado del hidrocarburo. Esta cantidad de agua corresponde al reparto mensual de los 1246 mm/m² de precipitación media anual en Santander, Cantabria (INM, 2001).

Tanto el vertido de hidrocarburos como la correspondiente simulación de lluvia, se dividieron en cuatro eventos, separados por distintos intervalos de tiempo para asegurar la afección del vertido de hidrocarburo sobre la probeta. Además, se decidió fijar la utilización del ensayo cántabro de pérdida por desgaste (NLT-352/00, 2000) para la evaluación de la acción de los hidrocarburos tras los distintos tratamientos a que se vieron sometidas las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con los tres betunes objeto del estudio.

III.3.4 ENSAYO DE ESCURRIMIENTO

La primera metodología de ensayo propuesta fue la de escurrimiento. En este ensayo las probetas se colocan encajadas en un soporte que permite el drenaje de los vertidos realizados, tanto de hidrocarburo como de agua (Figura III-28). En esta disposición son sometidas a un periodo de vertido sobre la cara superior, seguido de un periodo de escurrimiento a través de todo el espesor de la probeta. Tras este tratamiento se realiza la correspondiente evaluación mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste.



Figura III-28. Ensayo de escurrimiento de agua con hidrocarburos a través de probetas de mezcla bituminosa porosa.

El periodo de ensayo completo dura veintiocho días y cuenta con cuatro simulaciones de vertido compuestas por un goteo de hidrocarburo y una aportación de agua destilada al cabo de una hora. La simulación de lluvia se realiza también mediante goteo, con una duración aproximada de treinta minutos. Los periodos de escurrimiento entre vertidos son de siete días. Durante este tiempo, el hidrocarburo y el agua destilada penetran y actúan en el interior de la probeta de mezcla bituminosa porosa ensayada.

En la Figura III-29 se pueden observar doce series de cuatro probetas de mezcla bituminosa porosa fabricada con betún BM-3b. Estas series eran ensayadas simultáneamente con distintos niveles de vertido.



Figura III-29. Ensayo simultáneo de varias series de probetas de mezcla bituminosa porosa mediante la metodología de escurrimiento de agua con hidrocarburos.

La evaluación se realiza al cabo de los veintiocho días de ensayo. Se extraen las probetas de los soportes y se conservan a 20 °C durante al menos veinticuatro horas antes de su rotura según el ensayo cántabro.

El ensayo de escurrimiento se realizó con un único tipo de vertido de hidrocarburos: aceite usado de motor. Como hipótesis de partida se consideró que la mezcla bituminosa porosa fabricada con el betún anticarburante BAC ofrecería mayor resistencia a la acción de los hidrocarburos. Por tanto, se aplicaron para cada mezcla los siguientes niveles de vertido:

- Betún B 60/70: Nivel 0, Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3.
- Betún BM-3b: Nivel 0, Nivel 2, Nivel 3 y Nivel 4.
- Betún BAC: Nivel 0, Nivel 3, Nivel 4 y Nivel 5.

En total, se ensayaron ciento cuarenta y cuatro probetas con la metodología propuesta de escurrimiento, cuarenta y ocho probetas con cada tipo de betún.

III.3.5 ENSAYO DE SEMI-INMERSIÓN

La segunda metodología de ensayo propuesta fue la de semi-inmersión. En este ensayo las probetas se colocan en el fondo de un contenedor estanco, donde son sometidas a un periodo de vertido de hidrocarburo y agua destilada, seguido de un periodo de semi-inmersión en la escorrentía resultante. Tras este tratamiento se realiza la correspondiente evaluación de los efectos en la mezcla porosa mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

El periodo de vertido dura dos días y abarca cuatro simulaciones compuestas por un goteo de hidrocarburo y una aportación directa de agua destilada al cabo de una hora (Figura III-30). Cada simulación de vertido está separada entre sí por intervalos de tiempo de cinco horas, dieciocho horas y cinco horas.



Figura III-30. Ensayo de semi-inmersión de probetas de mezcla bituminosa porosa en agua con hidrocarburos.

Tras el periodo de vertido comienza el periodo de semi-inmersión. Este periodo tiene una duración de tres días, durante los cuales la probeta de mezcla bituminosa porosa permanece medio sumergida en el agua destilada mezclada con el hidrocarburo, ambos acumulados durante los vertidos. De este modo, el agua destilada con hidrocarburo cubre de la probeta hasta una altura de 3,5 a 4,0 cm.

En la Figura III-23 se pueden observar cuatro series de tres probetas de betún anticarburante BAC ensayadas a semi-inmersión. Estas series correspondían a semi-inmersión en agua destilada sin hidrocarburo, en agua destilada con aceite usado de motor, en agua destilada con gasolina y en agua destilada con gasoil.



Figura III-31. Ensayo simultáneo de varias series de probetas de mezcla bituminosa porosa mediante la metodología de semi-inmersión en agua con hidrocarburos.

Al cabo de los cinco días de duración del ensayo, se extraen las probetas y se conservan a 20 °C durante al menos veinticuatro horas, sometiéndose posteriormente al ensayo cántabro de desgaste para evaluar la afección de los distintos vertidos simulados.

El ensayo de semi-inmersión se realizó sobre los tres tipos de betunes con los siguientes vertidos: aceite usado de motor, gasolina y gasoil. Para cada mezcla se aplicaron los siguientes niveles de vertido:

- Betún B 60/70: Nivel 0 y Nivel 3 con cada uno de los tres hidrocarburos.
- Betún BM-3b: Nivel 0, Nivel 3 y Nivel 4 con cada hidrocarburo.
- Betún BAC: Nivel 0, Nivel 3 y Nivel 5 con cada hidrocarburo.

En total, se ensayaron cincuenta y siete probetas Marshall sometidas a semi-inmersión en agua destilada con hidrocarburos: once probetas fabricadas con betún B 60/70 (2, 3+3+3), veintitrés probetas fabricadas con betún BM-3b (5, 3+3+3, 3+3+3) y veintitrés probetas de mezcla porosa fabricada con betún BAC (5, 3+3+3, 3+3+3).

III.4 ENSAYO DE FUNCIONALIDAD DE FIRMES PERMEABLES

III.4.1 UBICACIÓN Y MATERIALES

El criterio de ubicación de las áreas experimentales fue el de cercanía a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, sede del Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria.

Con este criterio, la primera área experimental se construyó en el interior del nuevo Laboratorio de Firmes Filtrantes Biodegradantes de Hidrocarburos (FIDICA) de la Universidad de Cantabria. Este laboratorio está situado en el interior de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, a escasos veinte metros de las oficinas del GITECO.

Por su parte, la segunda área experimental se ejecutó en el Campus universitario de Santander. Para ello se solicitó la ocupación temporal de una superficie ajardinada situada entre la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones y la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos.

Por último, la tercera área experimental fue construida en Gijón, aprovechando la oportunidad brindada por el Ayuntamiento de esta ciudad. Así, fue posible construir las primeras plazas de aparcamiento experimentales con firmes permeables en España en el aparcamiento público situado junto al Palacio de Deportes de la Guía en Gijón.

Cada área experimental está constituida por un determinado número de modelos de secciones permeables completas con una ocupación en planta dada:

- Laboratorio FIDICA: dieciséis modelos con ocupación en planta reducida de $0,05 \text{ m}^2$ cada uno.
- Campus de Santander: dieciséis modelos con ocupación en planta media de $0,77 \text{ m}^2$ cada uno.
- Aparcamiento experimental de Gijón: quince modelos con ocupación en planta real de $12,50 \text{ m}^2$ cada uno.

Tomando como referencia la escala real de los modelos o plazas experimentales construidas en Gijón, los modelos ubicados en el Campus ocupan aproximadamente 1/16 en planta, y los modelos construidos en el Laboratorio FIDICA tienen una superficie de 1/250 de la real.

Las secciones completas de firmes permeables a ensayar en las tres áreas experimentales fueron (Tabla II-4 y Figura II-9):

- BA: pavimento de adoquines con capas granulares de árido calizo.
- BR: pavimento de adoquines con capas granulares de árido reciclado.
- PA: pavimento de mezcla bituminosa porosa con capas granulares de árido calizo.
- PR: pavimento de mezcla bituminosa porosa con capas granulares de árido reciclado.

Las cuatro secciones tipo cuentan con las mismas capas. La Tabla III-14 recoge un resumen de los espesores de las diferentes capas de las secciones de firme permeable correspondientes a los modelos ubicados en el Laboratorio, en el Campus y en Gijón. Además, en Gijón se contó con tres modelos con pavimento de césped reforzado, representante de la tipología del resto del aparcamiento permeable de la Guía.

Tabla III-14. Espesores de las distintas capas de los firmes permeables construidos en el Laboratorio, en el Campus y en Gijón.

Capa	Espesor según la ubicación		
	Laboratorio	Campus	Gijón
Superficie	10 cm	8 cm y 10 cm (adoquines y aglomerado poroso, respectivamente)	10 cm
Base	5 cm		
Separación	0,15 cm		
Subbase	25 cm		25-35 cm (inclinación del 2% hacia el desagüe)
Separación	0,05 cm		
Drenaje	5,3 cm		

Existen dos diferencias entre los espesores de las capas de las secciones construidas en los tres emplazamientos. La primera es el empleo de un adoquín con 8 cm de espesor en los modelos del Campus, en vez de 10 cm de espesor, como en el Laboratorio y Gijón. Este cambio fue debido a la falta de disponibilidad de material en el momento de la construcción. La segunda diferencia es el espesor variable de la capa subbase en los modelos de Gijón. Esta variación, de 25 cm a 35 cm, es debida a la inclinación del 2% en el fondo de las plazas de aparcamiento, necesaria para asegurar el drenaje del caudal efluente.

La Tabla III-15 presenta los principales materiales utilizados para la construcción de los modelos experimentales en cada una de las tres ubicaciones. En el *Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables*, se presentan algunas fotografías de estos materiales tomadas durante el proceso de construcción de los modelos.

Tabla III-15. Materiales empleados en la construcción de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.

Materiales	Procedencia según la ubicación		
	Laboratorio	Campus	Gijón
Adoquines	Bloques Montserrat	Aquaflow de Hanson-Formpave	Bloques Montserrat
Mezcla bituminosa	Fabricada en el Laboratorio de Caminos de Santander.	Fabricada en planta por Arruti.	Fabricada en planta por Alvargonzález.
Árido reciclado	Reciclado de construcción y derribo de la planta de BTB.		Reciclado de construcción y derribo de Alvargonzález.
Árido calizo	Acopios de diferentes tamaños de áridos de cantera del Laboratorio de Caminos Santander.		Cantera de Alvargonzález.
Estructuras de plástico	Celda de drenaje Atlantis.		
Geotextiles de filtro y separación.	Polifelt		
	Terratest		Danosa
Recipiente	Barreños industriales de Trilla-Denox.	Contenedores industriales de Kaiser + Kraft.	Explanada y separaciones verticales impermeabilizadas con membrana alveolar de polietileno.

Dadas las diferencias existentes en los espesores y materiales empleados en los distintos modelos, así como las diferentes escalas de ocupación en planta, no es posible la comparación directa entre las distintas ubicaciones de la funcionalidad de los firmes. Sin embargo, sí se pueden extraer conclusiones sobre cada tipo de sección en cada ubicación. Además, respecto a la durabilidad, no es posible tampoco ninguna comparación, únicamente extraer alguna conclusión de la observación visual de las plazas experimentales de Gijón, únicos modelos que soportan cargas reales de tráfico.

Para la construcción de las secciones tipo BA y BR, los adoquines empleados fueron suministrados por los fabricantes Bloques Montserrat para los casos del Laboratorio y el aparcamiento de Gijón (10 cm de espesor), y Hanson-Formpave para el caso de los modelos del Campus de Santander (8 cm de espesor). Su colocación, en todos los casos, se realizó sin recebo alguno de arena para permitir el paso del agua a través de la superficie (Figura III-32).



Figura III-32. Adoquines empleados en la construcción de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.

Por su parte, para la construcción de las secciones tipo PA y PR, la mezcla bituminosa porosa fue del tipo PA12. Para los modelos a escala reducida, el aglomerado poroso se fabricó en el Laboratorio de Caminos de Santander, obteniendo un porcentaje de huecos del 20% de promedio. Mientras, para los modelos a media escala, la mezcla bituminosa porosa fue fabricada en planta por la empresa constructora Arruti y compactada en moldes en Laboratorio, obteniendo un porcentaje de huecos del 22% de media. En el caso de los modelos a escala real, el aglomerado poroso fue fabricado en planta y puesto en obra por la empresa constructora Alvargonzález, resultando un promedio de 25% de huecos, estimados con el permeámetro LCS. En todos los casos se utilizó un riego de imprimación con emulsión ECI, para asegurar el contacto entre la capa de mezcla bituminosa y la capa base del firme permeable.



Figura III-33. Mezcla bituminosa empleada en la construcción de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.

Respecto a los materiales granulares utilizados en las capas base y subbase, fueron dos los tipos de áridos empleados: caliza de cantera y reciclado de residuos de construcción y demolición (RCDs). La característica fundamental analizada para cada tipo de árido fue la granulometría empleada en cada caso (UNE-EN 933-2, 1996). Los tamaños de áridos calizos empleados en las capas subbase de las secciones BA y PA (Figura III-34) corresponden a zahorras sin finos o zahorras drenantes, asegurando una alta permeabilidad e índice de huecos. Estos áridos calizos procedían de canteras situadas en las proximidades de Santander, para el caso de la construcción de los modelos del Laboratorio y del Campus, y de canteras situadas en las proximidades de Gijón, para el caso del aparcamiento de la Guía.

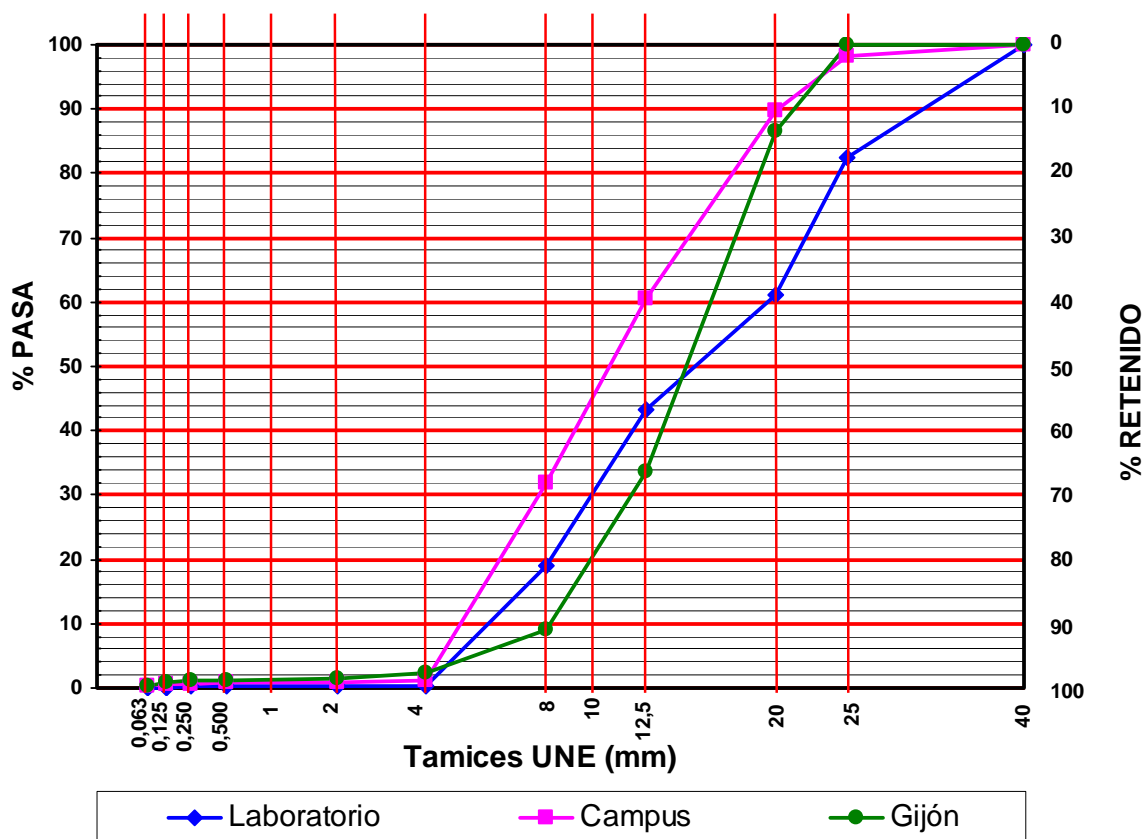


Figura III-34. Granulometrías de los áridos calizos empleados en la construcción de las capas subbase de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.

El principal inconveniente de este tipo de zahorras drenantes de granulometría continua sin finos es que no permiten un grado de compactación elevado, por lo que su puesta en obra puede presentar dificultades. Sin embargo, para la ejecución de las tres áreas experimentales este problema fue mínimo, dado que se contaba con límites de confinamiento que permitieron un mayor aprovechamiento de la energía de compactación empleada en cada caso.

La Figura III-35 muestra las granulometrías empleadas para las capas subbase de árido reciclado (secciones tipo BR y PR). Estas granulometrías fueron ajustadas, eliminando los finos, para asegurar la permeabilidad y el alto índice de huecos. Los áridos reciclados 0/40 fueron proporcionados por Bizkaiko Txintxor Berziklategia (BTB) o por Alvargonzález. Estos áridos reciclados fueron tamizados en los tres emplazamientos con mallas de abertura 4 mm, 6mm y 8 mm respectivamente, asegurando la eliminación de la mayor parte de los finos por debajo de los 4 mm.

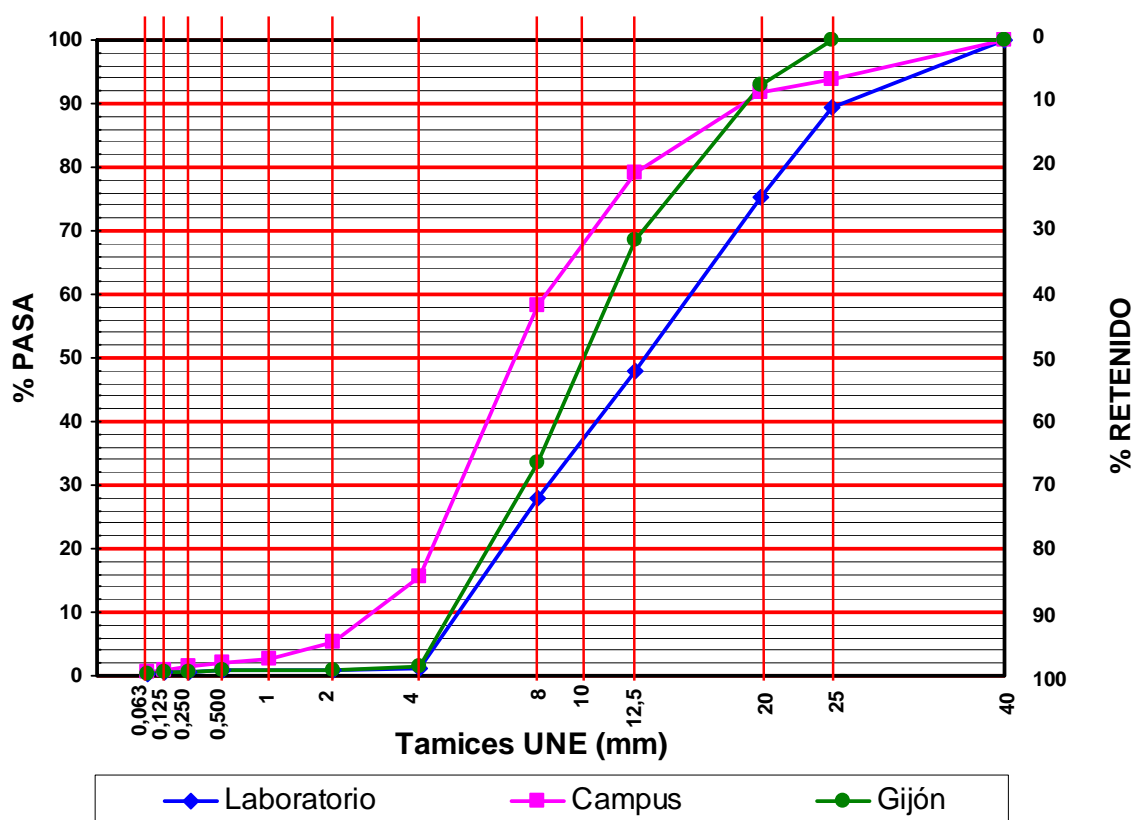


Figura III-35. Granulometrías de los áridos reciclados empleados en la construcción de las capas subbase de los modelos de firmes permeables del Laboratorio, del Campus y de Gijón.

Respecto a la naturaleza de las partículas, señalar que, a diferencia de los áridos calizos, procedentes de cantera, los áridos reciclados, procedentes del machaqueo de los residuos de construcción y demolición (RCDs), presentan una gran heterogeneidad. Así, aún estando formados fundamentalmente por hormigón y cerámica triturados, contienen porcentajes variables de madera, plásticos, arcillas, limos o incluso metales.

Respecto a los materiales granulares empleados en las capas base, estos fueron vertidos sobre una lámina de geotextil con las funciones de filtro y separación respecto a la subbase. Los áridos empleados fueron los mismos que los de las subbases en las secciones de firme con

superficie de mezcla bituminosa (secciones PA y PR). Mientras, en las secciones de firme con superficie de adoquines (secciones BA y BR), la base o cama de asiento se construyó con arena gruesa de tipo calizo, cuyas granulometrías se presentan en la Figura III-36. Como se puede apreciar, comparando la Figura III-36 con la Figura III-34 y la Figura III-35, las zahorras drenantes presentan una mayor continuidad de tamaños que arenas gruesas empleadas en la base o cama de asiento de los adoquines.

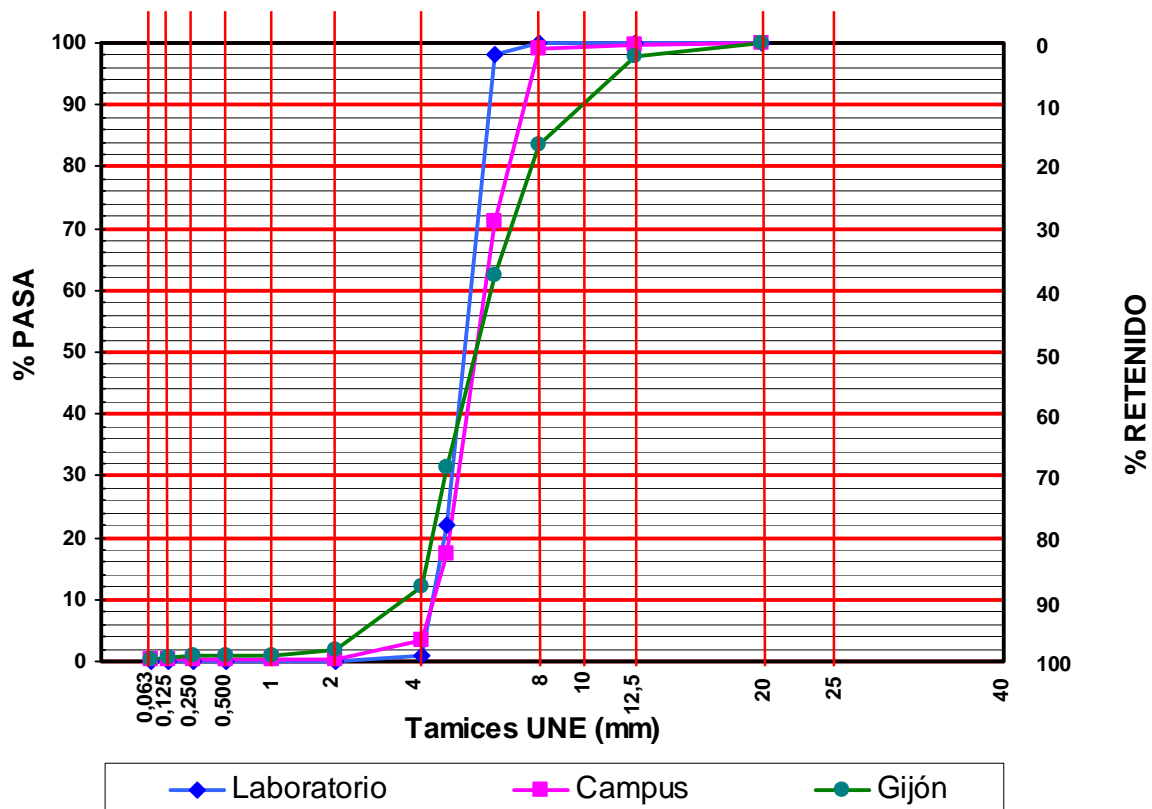


Figura III-36. Granulometrías de los áridos calizos empleados en la construcción de las capas base de los modelos de firmes permeables con superficie de adoquines con ranuras del Laboratorio, del Campus y de Gijón.

Respecto a los geotextiles empleados como filtro y separación, estos fueron no tejidos punzonados de fibras de polipropileno. Entre la base y la subbase se empleó el geotextil Polifelt TS-30 en todos los casos. Mientras, entre la subbase y las estructuras de plástico, se empleó el geotextil Pavemat de Terratest en el Laboratorio y en el Campus y el Danofelt PP 125 en Gijón. Todos ellos cuentan con una porometría por encima de 0,11 mm y una permeabilidad mayor de $5 \cdot 10^{-2}$ cm/s. Por último, respecto a las estructuras de plástico empleadas en el fondo de las secciones como drenaje, estas fueron celdas de 53 mm de altura fabricadas con polietileno de alta densidad por la empresa especializada Atlantis.

III.4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

III.4.2.1 Modelos de Laboratorio

En el Laboratorio FIDICA de la Universidad de Cantabria se construyeron un total de dieciséis modelos: cuatro réplicas de cada una de las cuatro secciones objeto del estudio (Figura III-37).

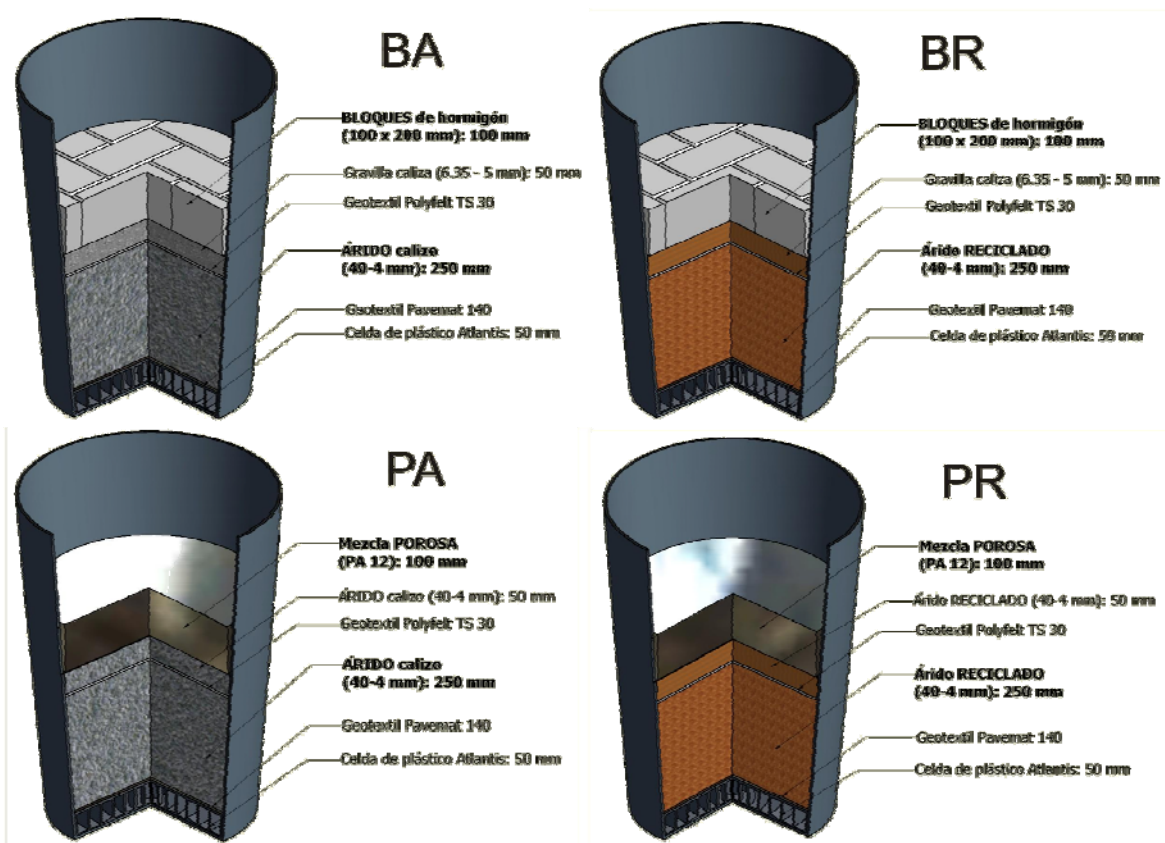


Figura III-37. Secciones de firmes permeables construidas en el Laboratorio FIDICA.

Para albergar cada uno de los modelos del Laboratorio FIDICA se emplearon barreños industriales impermeables de polietileno de alta densidad de la marca Trilla-Denox. Estos recipientes tienen una altura de 64 cm, un diámetro superior de 48 cm y una capacidad de setenta litros.

El drenaje inferior de los modelos se realizó perforando los barreños y colocando una celda de drenaje de plástico sobre el fondo. Dicha celda de drenaje se cubrió con un geotextil de filtro y separación sobre el que se vertieron los materiales granulares correspondientes a la capa subbase, colocando el resto de capas hasta completar la sección a construir. De este

modo, el agua infiltrada a través de la superficie del firme permeable, atraviesa toda la sección y percola a través de toda la superficie del geotextil en el espacio de la celda de drenaje, fluyendo hacia el correspondiente punto de control del efluente.

El método constructivo de los modelos de laboratorio se puede resumir en las siguientes etapas (las cuatro últimas recogidas en la Figura III-38):

1. Realización de las perforaciones de drenaje en el fondo del cubo.
2. Ajuste de la celda de plástico en el fondo del recipiente.
3. Colocación de la capa geotextil de filtro y separación entre celda y subbase.
4. Preparación de la granulometría de los áridos y colocación de la correspondiente subbase con una compactación ligera.
5. Colocación de la capa de geotextil de filtro y separación entre subbase y base.
6. Preparación de la granulometría de los áridos y colocación de la correspondiente base con compactación ligera.
7. Ajuste de la correspondiente superficie, bien sea colocación de adoquines o colocación de probetas de mezcla bituminosa porosa.



Figura III-38. Etapas de la construcción de los modelos de firmes permeables del Laboratorio FIDICA.

III.4.2.2 Modelos del Campus

En el Campus de la Universidad de Cantabria en Santander se construyeron un total de dieciséis modelos: cuatro réplicas de cada una de las cuatro secciones objeto del estudio. Las secciones de estos modelos son similares a las de los modelos de Laboratorio (Figura III-37), con la única diferencia de que estas están expuestas a la intemperie y, por tanto, al régimen de precipitaciones de Santander (Figura III-39).



Figura III-39. Modelos de firmes permeables del Campus de la Universidad de Cantabria, Santander.

Para la construcción de los modelos de media escala, se emplearon contenedores industriales impermeables de polietileno inyectado a baja presión con unas dimensiones interiores de 1110 mm x 710 mm x 610 mm y una carga admisible de 500 kg. Estos contenedores fueron nivelados con inclinaciones de dos grados sexagesimales (3,5%), en dirección longitudinal, y un grado sexagesimal (1,7%), en dirección transversal, asegurando de este modo el flujo del efluente hacia la tubería de desagüe.

Respecto a los métodos constructivos empleados en los modelos del Campus de Santander, la principal diferencia respecto a la ejecución de los del Laboratorio la constituyó el mayor volumen de materiales necesario y la complicación de su puesta en obra. Así, los materiales granulares fueron tamizados en grandes cantidades utilizando mallas de 6 mm para eliminar la mayor cantidad de finos posible. Además, la mezcla bituminosa fue fabricada en

planta, transportada y compactada en moldes a medida en laboratorio para ser colocada posteriormente en forma de losa en los correspondientes contenedores. En el *Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables* se recogen algunas fotografías del proceso de construcción de los modelos de firmes permeables.

El método constructivo se puede resumir en las siguientes etapas (las cuatro primeras recogidas en la Figura III-40):

1. Realización de la perforación de drenaje en el fondo del contenedor.
2. Ajuste de la celda de plástico en el fondo del contenedor.
3. Colocación de la capa geotextil de filtro y separación entre celda y subbase.
4. Preparación de la granulometría de los áridos y colocación de la correspondiente subbase con una compactación ligera.
5. Colocación de la capa de geotextil de filtro y separación entre subbase y base.
6. Preparación de la granulometría de los áridos y colocación de la correspondiente base con compactación ligera.
7. Ajuste de la correspondiente superficie, bien sea colocación de adoquines o colocación de mezcla bituminosa en forma de losa.

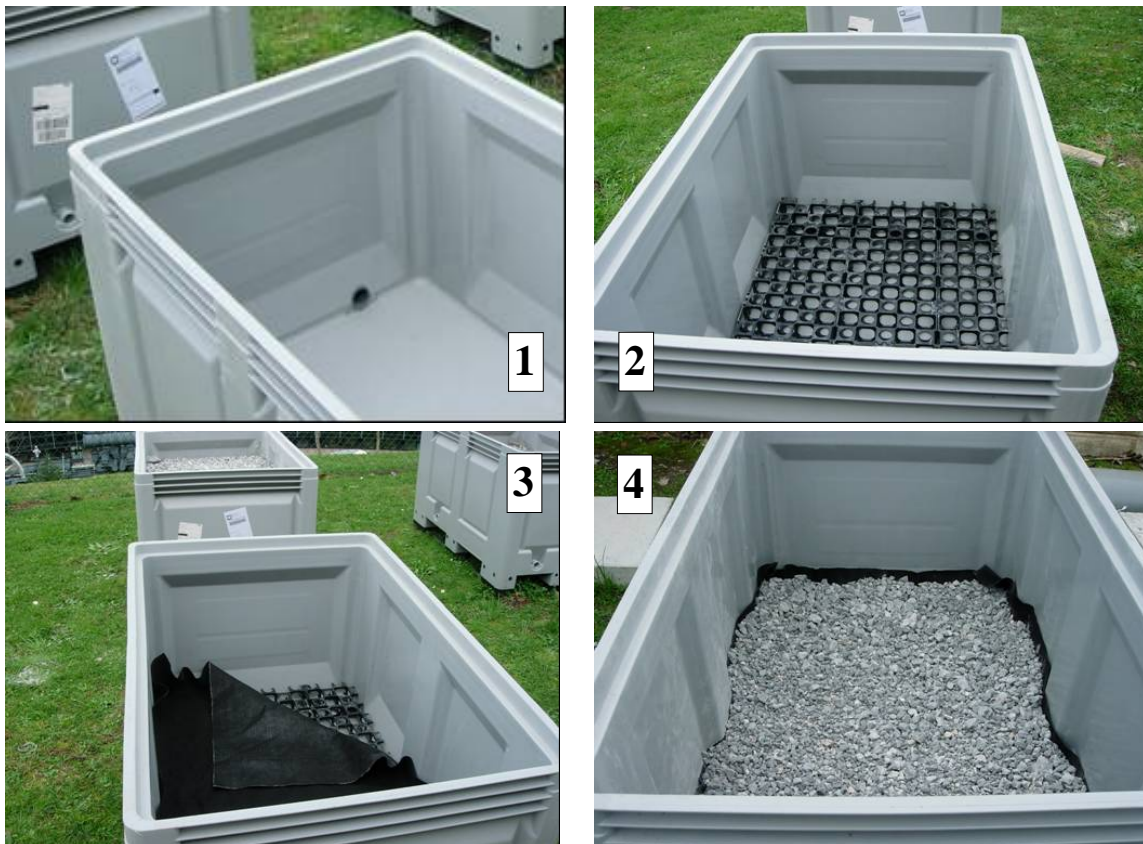


Figura III-40. Etapas de la construcción de los modelos de firmes permeables del Campus de Santander.

III.4.2.3 Modelos de Gijón

En el aparcamiento público del Palacio de Deportes de la Guía, en Gijón, se construyeron un total de quince modelos experimentales de firmes permeables: tres réplicas con cada una de las cuatro secciones objeto de estudio (BR, BA, PA y PR), y tres réplicas más de la sección tipo de césped reforzado colocada en el resto del aparcamiento. La distribución de las plazas queda recogida en la Figura III-41 y las secciones en la Figura III-42.

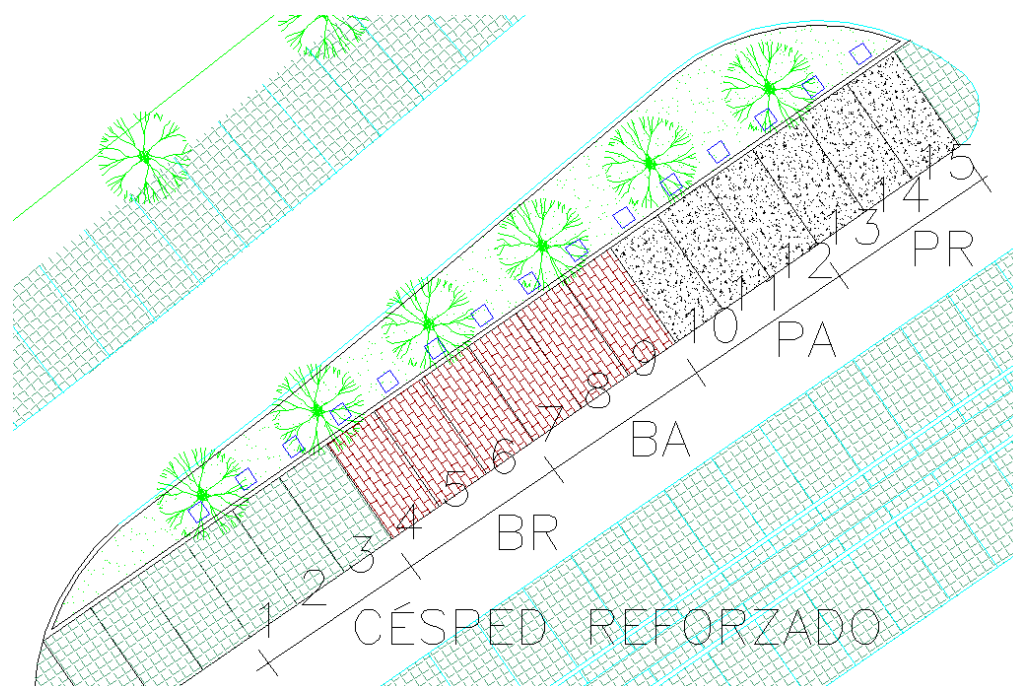


Figura III-41. Modelos de firmes permeables o plazas experimentales del aparcamiento del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón.

Todos los modelos construidos a escala real están impermeabilizados independientemente. Así, cada una de las plazas de aparcamiento experimentales se separó de la siguiente mediante encofrados perdidos de madera cubiertos con membrana alveolar de impermeabilización. Los límites laterales junto con la explanada, constituyen un recipiente estanco para cada modelo con unas dimensiones de 2,5 m de ancho, 5,0 m de largo y 0,5 cm de profundidad.

El drenaje subterráneo de cada plaza está diseñado para concentrar el agua filtrada por cada sección en una arqueta independiente que permite la monitorización del efluente. A cada plaza se le dió una pendiente longitudinal del 2% y una pendiente transversal también del 2%. Estas inclinaciones del fondo permiten la recogida del agua infiltrada en la arqueta correspondiente, situada en la esquina inferior de cada plaza (Figura III-43).

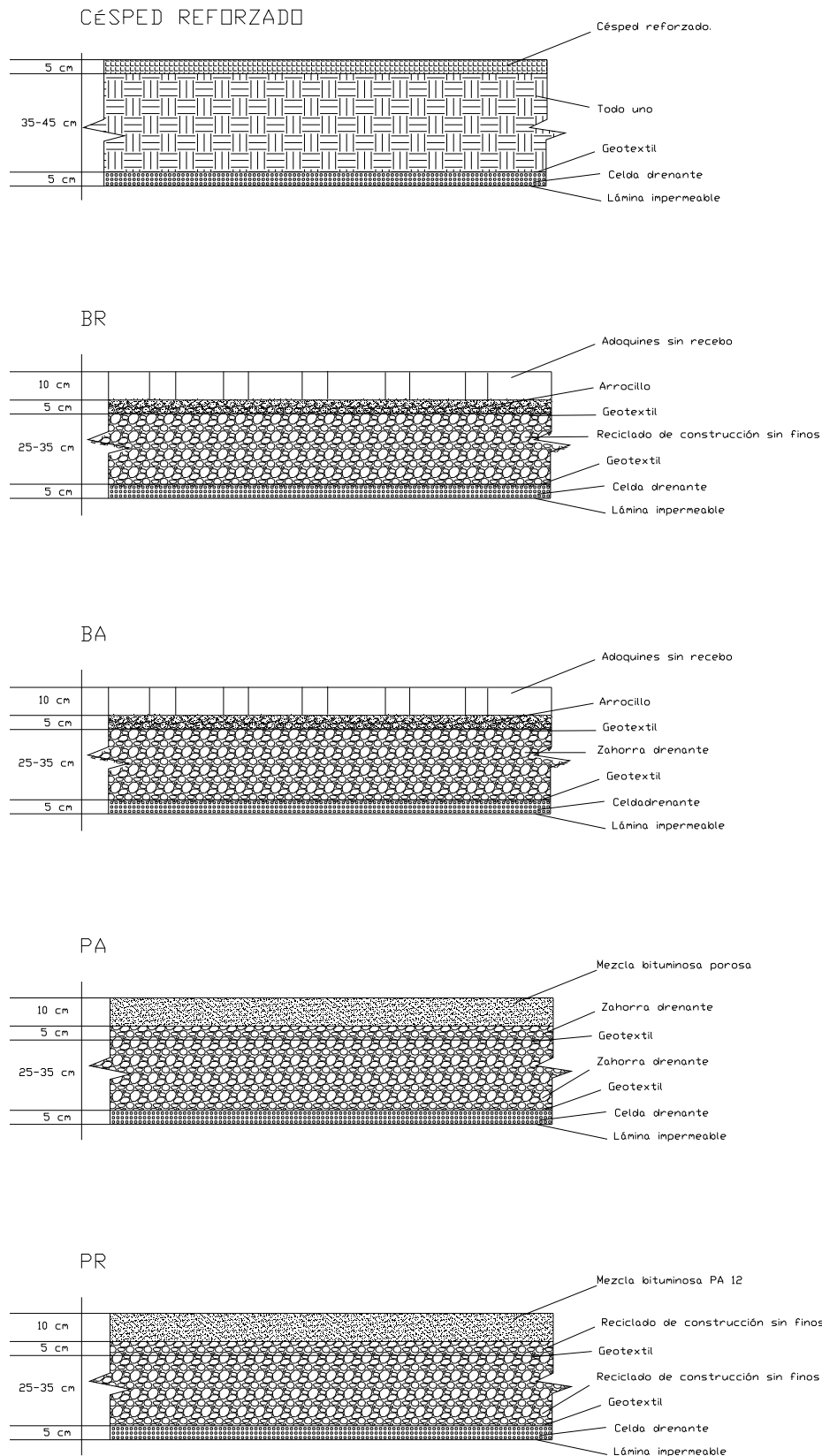


Figura III-42. Secciones de firmes permeables construidas en el aparcamiento experimental del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón.

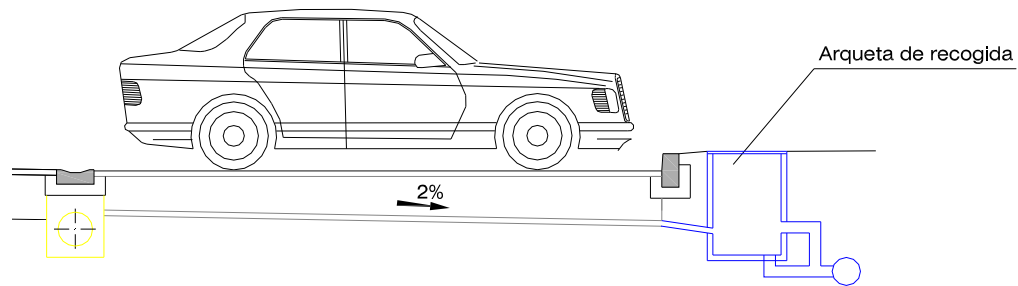


Figura III-43. Sistema de recogida del efluente de agua infiltrada a través de los firmes permeables del aparcamiento experimental de la Guía, Gijón.

El método constructivo empleado en Gijón, se puede resumir en las siguientes etapas:

1. Nivelación de la explanada, colocación de las separaciones laterales, impermeabilización y conexión de drenaje a la arqueta correspondiente.
2. Ajuste de la celda de plástico en el fondo de la plaza.
3. Colocación de la capa geotextil de filtro y separación entre celda y subbase.
4. Preparación de los áridos y colocación de la correspondiente subbase, con una compactación ligera (Figura III-44).
5. Colocación de la capa de geotextil de filtro y separación entre subbase y base.
6. Preparación de los áridos y colocación de la correspondiente base con compactación ligera.
7. Puesta en obra de la correspondiente superficie, bien sea colocación de adoquines o colocación de mezcla bituminosa con una ligera compactación.

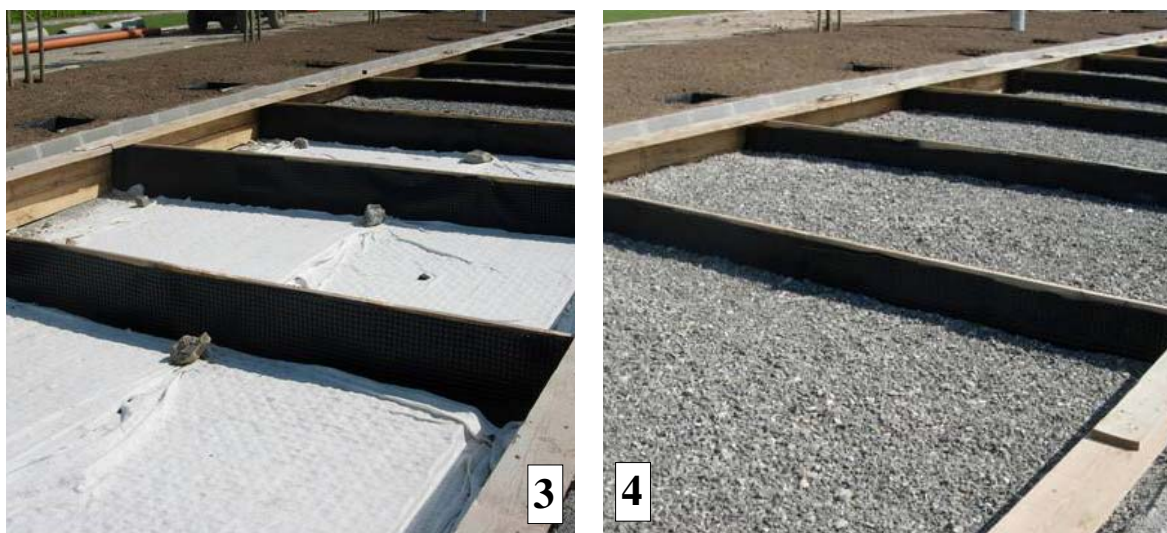


Figura III-44. Etapas de la construcción de los modelos de firmes permeables de Gijón en el aparcamiento experimental de la Guía.

III.4.3 APORTACIONES DE AGUA

Para la evaluación de la funcionalidad de los firmes permeables es necesario contar con un aporte de agua conocido que permita la caracterización del comportamiento de la sección permeable. Este aporte de agua puede ser de dos tipos:

- Natural: correspondiente al régimen de precipitaciones propio de la localización geográfica en la que se encuentre la sección permeable a ensayar.
- Artificial: correspondiente a una simulación que puede ser la misma para cualquier localización geográfica de la sección permeable a ensayar.

Las precipitaciones naturales se han empleado únicamente en el análisis de la funcionalidad de los firmes permeables construidos en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón. La información meteorológica necesaria para este estudio corresponde a la estación de Gijón de la Agencia Estatal de Meteorología (autorización 390050781 para la publicación de esta información).

Por su parte, las precipitaciones simuladas se han empleado en los tres emplazamientos experimentales construidos. Este tipo de aportaciones controladas de agua ofrecen la ventaja de poder decidir el momento y la duración del ensayo. Las principales características de las aportaciones de agua artificiales llevadas a cabo quedan recogidas en la Tabla III-16. La cantidad de agua empleada en la simulación, el área sobre el que se vierte esta cantidad y el tiempo en el que se realiza el vertido son parámetros que deben ajustarse en función de los objetivos de cada aportación en particular. Así, en el Laboratorio se realizó la simulación de lluvia más precisa, mientras que en el Campus y en Gijón el objetivo era comprobar los resultados del Laboratorio de una manera lo más acotada y sencilla posible.

Tabla III-16. Simulaciones de lluvia o aportaciones de agua artificiales realizadas en el Laboratorio, en el Campus y en Gijón.

Emplazamiento	Cantidad de agua vertida (l)	Área de vertido (m²)	Tiempo de vertido (min)
Laboratorio	2,50	0,05	60
Campus	1,25	0,05	1
Gijón	25,00	1,00	1

El propósito de la simulación de lluvia en el Laboratorio era someter a los modelos de firmes permeables a un régimen constante de lluvias a lo largo del tiempo. Como referencia se tomó la precipitación media anual registrada en Santander en el periodo 1971-2000 (INM,

2001), cuyo valor es de 1246 mm. Esta precipitación se repartió a lo largo del año en veintiséis aguaceros espaciados cada dos semanas. Cada aguacero simulado tenía una duración de una hora, por lo que su intensidad debía ser de cincuenta litros por metro cuadrado (50 mm/h) para obtener una precipitación anual de 1300 mm, ligeramente superior a la referencia marcada. Estos aguaceros simulados en el Laboratorio tienen un periodo de retorno de 100 años en Santander (Dirección General de Carreteras, 1990 y 1999).

La simulación en el Laboratorio fue la única que se realizó con agua destilada. Esto permitió el estudio y análisis completo de la biodegradación localizada en los geotextiles correspondiente a la segunda parte del proyecto FIDICA. Además, en estas simulaciones se emplearon goteros de caudal graduable para representar lo más fielmente posible la aportación de agua natural, incluido el efecto de las gotas de lluvia. En total se prepararon cuatro simuladores iguales para realizar simultáneamente la simulación de lluvia sobre las cuatro réplicas de cada tipo de sección (Figura III-45). Cada simulador está compuesto por un bidón cilíndrico de plástico con dieciocho goteros regulables insertados en su base inferior. Los goteros están dispuestos en dos círculos concéntricos de diámetros 10 cm y 20 cm, con seis y doce goteros, respectivamente. Dado que el área de vertido es de $0,05 \text{ m}^2$, correspondiente a un círculo de diámetro 0,25 metros sobre el pavimento permeable, el volumen que debía verterse en una hora para simular la intensidad marcada era de 2500 ml. Dentro de la hora, los simuladores producían una precipitación de intensidad decreciente con el paso del tiempo y el descenso de la altura de carga sobre los goteros.



Figura III-45. Simuladores de lluvia empleados con los modelos de firmes permeables del Laboratorio FIDICA.

La relación del volumen precipitado con el tiempo queda recogida en Figura III-46, y supone una variabilidad de la intensidad simulada desde los 300 mm/h al cabo de los dos primeros minutos, hasta el valor fijado de 50 mm/h al cabo de la hora de simulación.

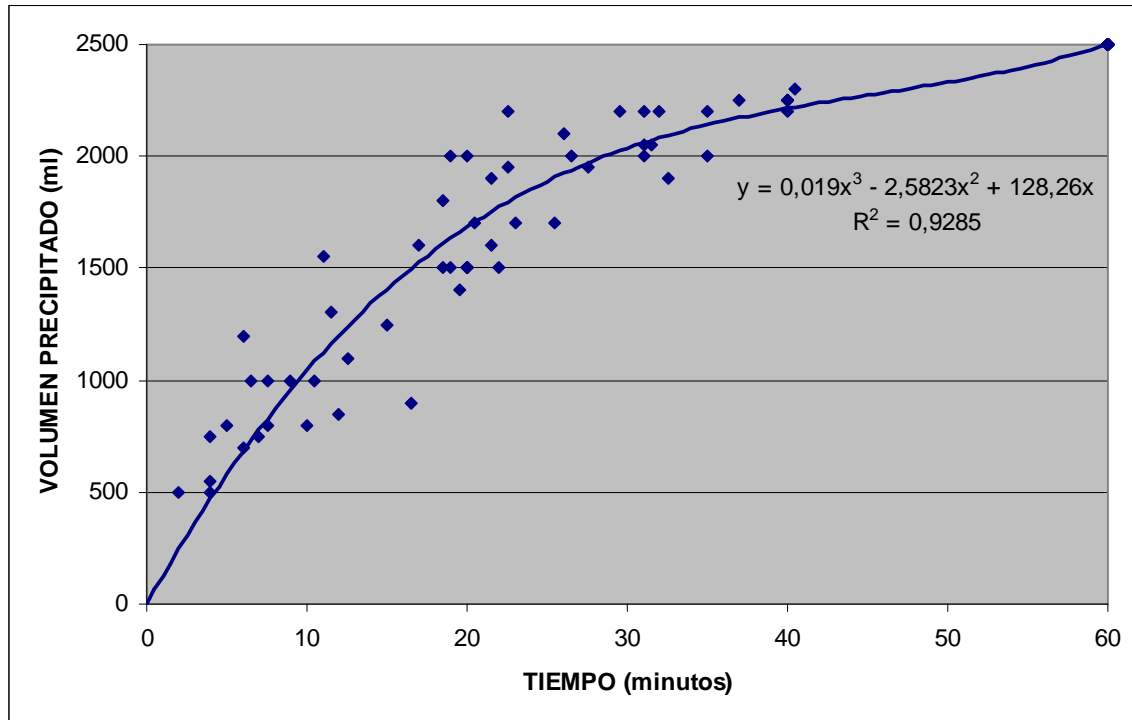


Figura III-46. Ajuste del volumen precipitado con los simuladores de lluvia empleados en el Laboratorio FIDICA en función del tiempo.

Por su parte, las aportaciones de agua sobre los modelos a escala media y real, en el Campus y en Gijón, se realizaron mediante vertido directo de una cantidad conocida de agua en un área fijada con una duración determinada (Tabla III-16). Las áreas delimitadas para la aportación del agua se acotaron para que las condiciones de contorno fuesen las mismas y la cantidad de agua a aportar no fuese excesiva. Estas áreas de aportación se situaron en la zona más alejada del desagüe del efluente de la sección permeable para determinar la reacción y respuesta pésimas ante una aportación extrema. Esta aportación pésima fue en ambos casos la misma: veinticinco litros por metro cuadrado en un minuto. Esta aportación permite acelerar el ensayo y obtener resultados pésimos de la funcionalidad del firme permeable, siempre del lado de la seguridad. Como muestra, la Figura III-47 presenta el recipiente de veinticinco litros de agua, listo para verter en la esquina de una plaza experimental de sección tipo PR en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Figura III-47. Aportación de agua artificial o precipitación simulada sobre una plaza experimental de firme permeable del aparcamiento de la Guía, Gijón.

Para la caracterización de la funcionalidad de los cuatro tipos de secciones permeables objeto de estudio se realizaron un total de treinta y siete simulaciones de lluvia en el Laboratorio, empleando la primera para humedecer los materiales de construcción recién colocados. En los modelos de firmes permeables construidos en el Campus de Santander únicamente se realizaron cuatro aportaciones de agua simuladas, para comprobar los resultados obtenidos en el Laboratorio. Mientras, en las plazas experimentales del aparcamiento de la Guía en Gijón se emplearon nueve precipitaciones naturales y diez aportaciones de agua simuladas para la obtención de los resultados de reacción y respuesta de los distintos tipos de secciones permeables construidas a escala real.

III.4.4 ENSAYO DE REACCIÓN Y RESPUESTA

El comportamiento hidráulico de los firmes permeables presenta una gran complejidad debido a la heterogeneidad de los materiales que componen sus distintas capas. Sin embargo, la caracterización de la funcionalidad de un firme permeable es posible mediante mediciones de parámetros básicos. Así, en las tres áreas experimentales con las que se cuenta, los modelos construidos están preparados a tal efecto, y no presentan en ningún caso problema alguno de colmatación o bloqueo de la superficie, permitiendo la caracterización de la funcionalidad de los diferentes tipos de secciones permeables.

La metodología de ensayo propuesta para la caracterización de la funcionalidad de los firmes permeables requiere dos mediciones: reacción del firme al aporte de agua y respuesta del mismo a lo largo del tiempo. En primer lugar, el tiempo de reacción de un firme permeable se define como el intervalo que transcurre entre el momento en que inicia la aportación de agua sobre la superficie y el momento en que se detecta la aparición de un caudal efluente en el desagüe de la sección permeable. En segundo lugar, la respuesta del firme permeable a lo largo del tiempo se evalúa mediante la medición del volumen efluente acumulado a partir de la reacción a un aporte de agua.

Para la evaluación del tiempo de reacción, se emplearon los datos horarios de la AEMET en el caso de las lluvias naturales y un cronómetro en el caso de las simulaciones de lluvia. Mientras, para la obtención de las series de volumen efluente a lo largo del tiempo se emplearon cinco pluviómetros de balancín o cazoletas basculantes, colocados bajo el desagüe del efluente de las secciones permeables. De los cinco pluviómetros utilizados, cuatro requerían de registro manual de los valores de volumen acumulado a lo largo del tiempo y uno contaba con registro de datos. Los cuatro pluviómetros sin registro de datos se emplearon para evaluar simultáneamente varias réplicas de firmes permeables durante las simulaciones de lluvia que se realizaron en los emplazamientos experimentales. Estos pluviómetros son de la marca Oregon Scientific modelo RGR122. Por su parte, el pluviómetro con registro de datos forma parte de una estación meteorológica Oregon Scientific modelo WMR928NX, y se empleó únicamente en el emplazamiento experimental de Gijón para la monitorización de las lluvias naturales. Este pluviómetro estaba conectado a una memoria Data-Pak de SkyView Systems, siendo alimentados ambos equipos con una batería de 12 V (72Ah/20Hr) que necesitaba ser cambiada cada cuatro días aproximadamente. Todos los pluviómetros tienen una sensibilidad de cuarenta y cinco segundos en la medición del tiempo, y 7,2 ml en la medición del volumen, siendo este volumen correspondiente al vuelco de la cazoleta con el pluviómetro nivelado.

En todos los modelos construidos en las tres ubicaciones experimentales, el aporte de agua se reparte entre volumen efluente y volumen retenido, incluyéndose en este último las posibles pérdidas. Este reparto es posible dado que en las tres áreas experimentales se impide la formación de escorrentía superficial mediante limitaciones laterales de los modelos. Por último, la Figura III-48 recoge el equipo completo de ensayo de reacción y respuesta para el análisis de la funcionalidad de una sección completa de firme permeable en el Laboratorio FIDICA: simulador de lluvia para el aporte de agua, sección permeable y equipo de medición del efluente.

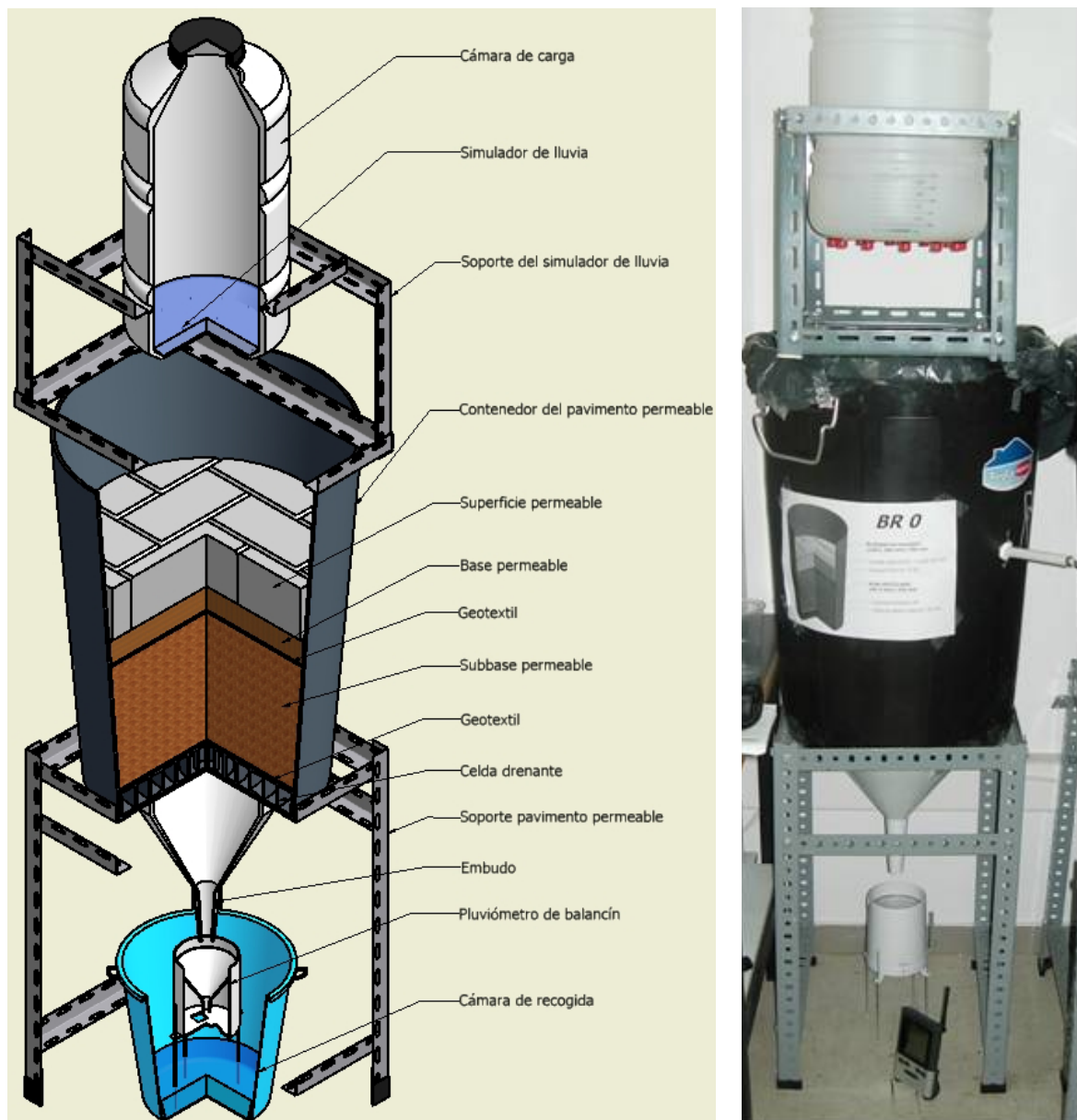


Figura III-48. Equipamiento completo del ensayo de reacción y respuesta en el Laboratorio FIDICA.

CAPÍTULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 RESISTENCIA A LA COLMATACIÓN DE DISTINTAS GEOMETRÍAS DE ADOQUINES CON RANURAS

Los resultados de los ensayos de resistencia a la colmatación con distintas geometrías de adoquines con ranuras, se recogen de forma detallada en el *Anexo 1: Resistencia a la colmatación de distintas geometrías de adoquines con ranuras*. Se recuerda que las cuatro geometrías de adoquines ensayadas contaban con la misma superficie libre para la infiltración (6 cm^2) y el mismo espesor (8 cm). Además, las intensidades de los aguaceros simulados de treinta minutos fueron ajustadas entre 50 mm/h y 70 mm/h, correspondiendo con periodos de retorno de 15 y 100 años, respectivamente, en Santander. Los pavimentos construidos con las distintas geometrías de adoquines fueron expuestos simultáneamente a la precipitación directa y la entrada de escorrentía superficial.

IV.1.1 SUPERFICIE RECIÉN COLOCADA

La Figura IV-1 presenta el porcentaje acumulado de agua infiltrada recogida en las cinco cámaras situadas bajo la muestra y el porcentaje de escorrentía residual recogido al final de la misma, ambos correspondientes al pavimento de adoquines con ranuras de geometría romboidal (B1), recién colocado. El comportamiento registrado para las tres primeras inclinaciones ensayadas (0%, 2% y 5%) es prácticamente paralelo hasta los tres quintos de la muestra. Este ritmo de infiltración se atenúa en las últimas cámaras con las pendientes más bajas, manteniéndose hasta la cámara 5 para la pendiente del 5%. Mientras, con el 10% de inclinación, la cámara 5 es la que más recoge. Respecto a la escorrentía superficial recogida al final de la muestra recién colocada, el porcentaje de agua medido en la cámara 6, encargada de la recogida de esta escorrentía residual, respecto al total, es menor del 1% para las inclinaciones del 0% y el 2%, y tiene un máximo de 5,0% para el 10% de inclinación.

Las respuestas de infiltración y escorrentía correspondientes a la geometría circular de las ranuras, adoquín tipo B2, se recogen en la Figura IV-2. Sin inclinación, la cámara 3 es la que recoge mayor cantidad de agua después de la cámara 1. Al 2% y al 5% de inclinación, la cantidad de agua recogida por las cámaras 1, 3 y 4 fue prácticamente la misma. Estas dos inclinaciones se diferencian por la mayor cantidad recogida en la cámara 2 con el 2% de inclinación, y por la cámara 5 en el caso del 5% de pendiente. Por su parte, con la inclinación máxima del 10%, la infiltración recogida en la primera cámara es prácticamente nula y el incremento del agua infiltrada es constante a partir de la cámara 2. Las escorrentías residuales recogidas en la cámara 6 son mayores del 1% a partir del 2% de inclinación, presentando un máximo de 7,1% para la muestra recién colocada con inclinación máxima del 10%.

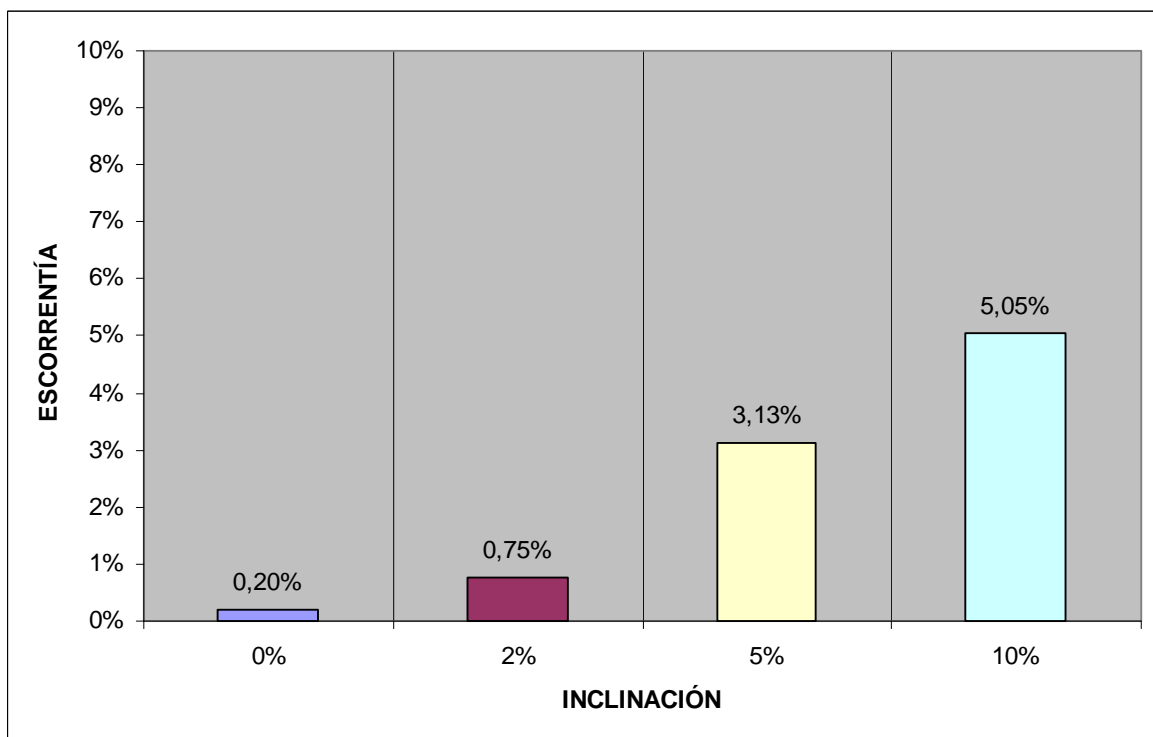
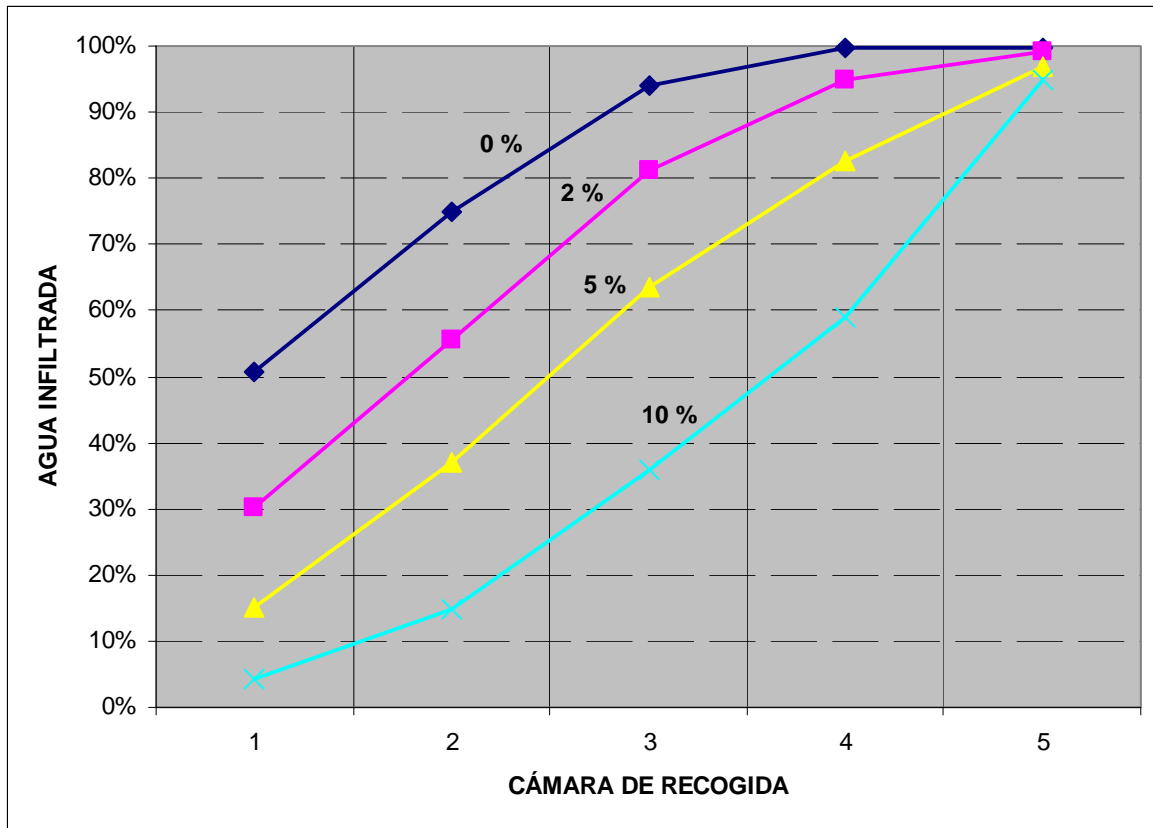


Figura IV-1. Porcentajes de agua infiltrada y de escurrentía según la pendiente para el adoquín tipo B1 (hueco romboidal) recién colocado.

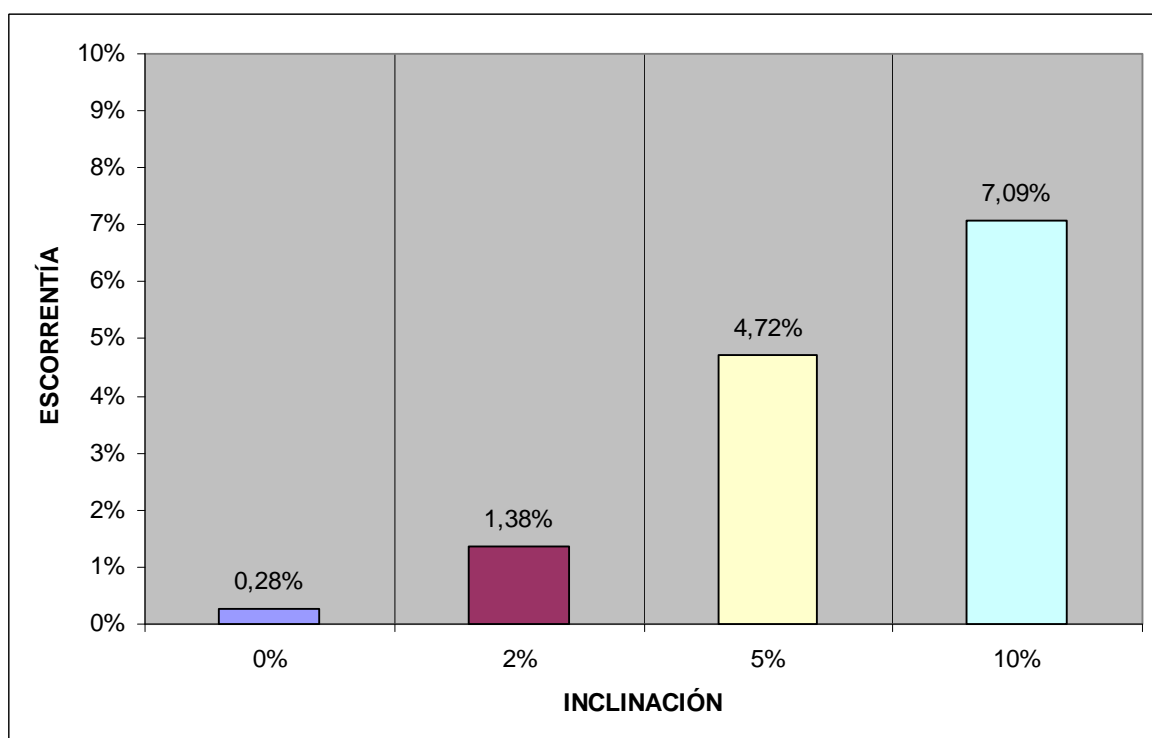
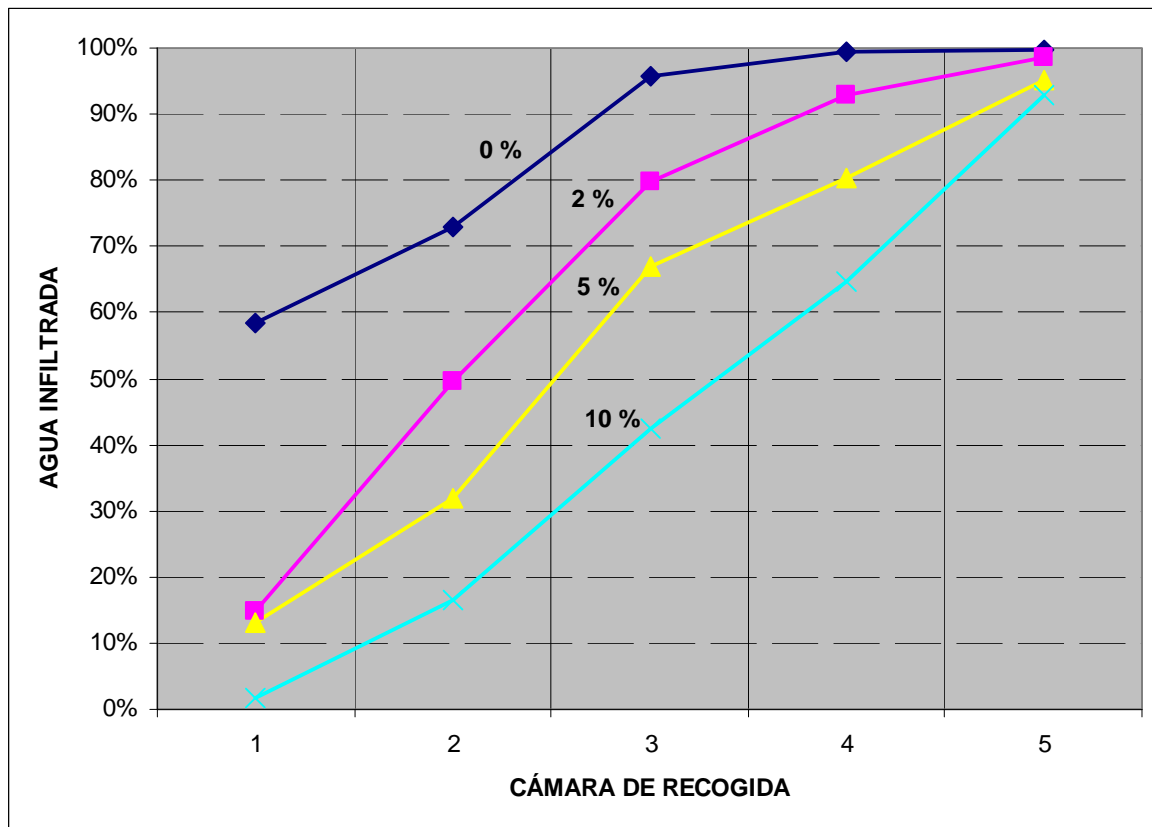


Figura IV-2. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B2 (huevo circular) recién colocado.

En la Figura IV-3, correspondiente a la geometría de adoquín con ranuras cuadradas, tipo B3, se puede observar un comportamiento semejante para todas las pendientes, con un quiebro en la cámara 2 y una confluencia final en la cámara 5. Así, partiendo de un volumen inicial recogido en la cámara 1, el cual desciende al aumentar la inclinación, el volumen total recogido se va incrementando hasta alcanzar prácticamente el 100% en la cámara 5. Además, al disminuir el volumen de partida, se observa como con las pendientes mayores aumentan los volúmenes recogidos en las cámaras 4 y 5.

Respecto a la escorrentía superficial recogida al final de la muestra recién colocada, el porcentaje de agua medido en la cámara 6 respecto al total es mayor del 3% con la inclinación del 2%, mayor del 5% para la pendiente del 5% y presenta un máximo del 8,6%, como era de esperar, con el 10% de inclinación.

Por último, la Figura IV-4 recoge los resultados obtenidos con la geometría de adoquín con ranuras elípticas, tipo B4. En ella se observa de nuevo la tendencia lógica de disminución de agua recogida en la cámara 1 al aumentar la inclinación y confluencia por encima del 90% de los valores acumulados en la cámara 5. Como particularidades destacan los picos de agua recogida por la cámara 3 para las inclinaciones del 0%, 2% y 5%. Además de la baja cantidad de agua infiltrada recogida por la cámara 4 con la pendiente máxima del 10%, compensada posteriormente con un importante porcentaje aportado por la cámara 5.

Para los adoquines con geometría elíptica de las ranuras, las escorrentías residuales recogidas en la cámara 6 son ligeramente superiores del 1% del total del agua para la pendiente del 2%, siendo el máximo de un 6,2% de escorrentía superficial al final de la muestra recién colocada con la inclinación del 10%.

En resumen, recién colocadas, las cuatro geometrías de adoquines con ranuras muestran una capacidad de infiltración excelente bajo las condiciones ensayadas. Sin embargo, sin carga alguna de sedimento que impida el libre paso del agua a través de las ranuras libres del pavimento, se observa en todos los casos un descenso de la cantidad de agua infiltrada recogida en la primera cámara al aumentar la inclinación de la muestra. Esta cámara está situada debajo de los 10 cm iniciales de muestra de pavimento permeable, los cuales reciben primero la lámina de escorrentía superficial simulada, contando además con la correspondiente aportación de precipitación directa. Por tanto, al aumentar la inclinación del pavimento permeable, se aumenta la velocidad de la lámina de escorrentía, siendo atrapada en menor medida en los huecos del pavimento, sea cual sea su geometría.

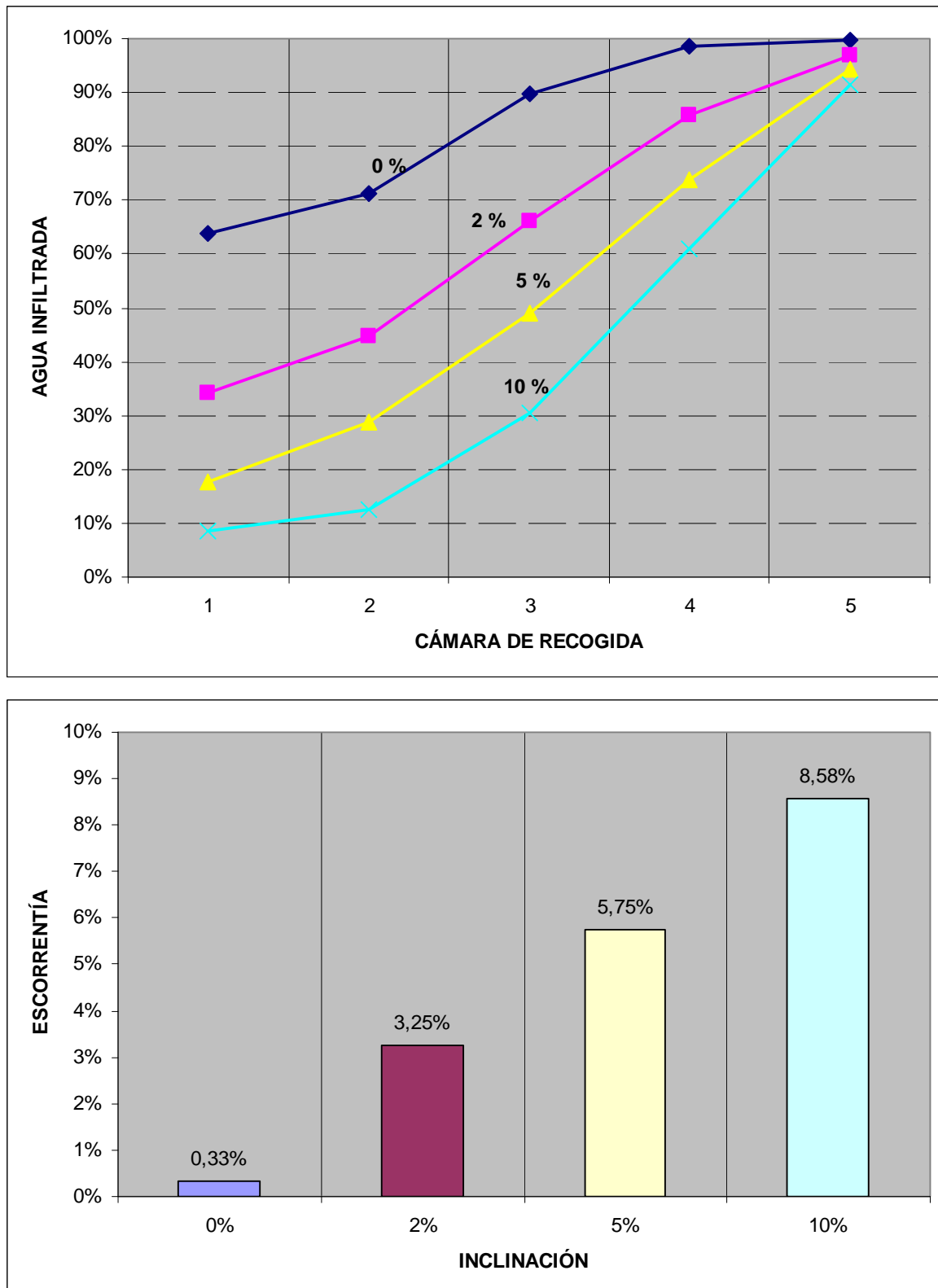


Figura IV-3. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B3 (hueco cuadrado) recién colocado.

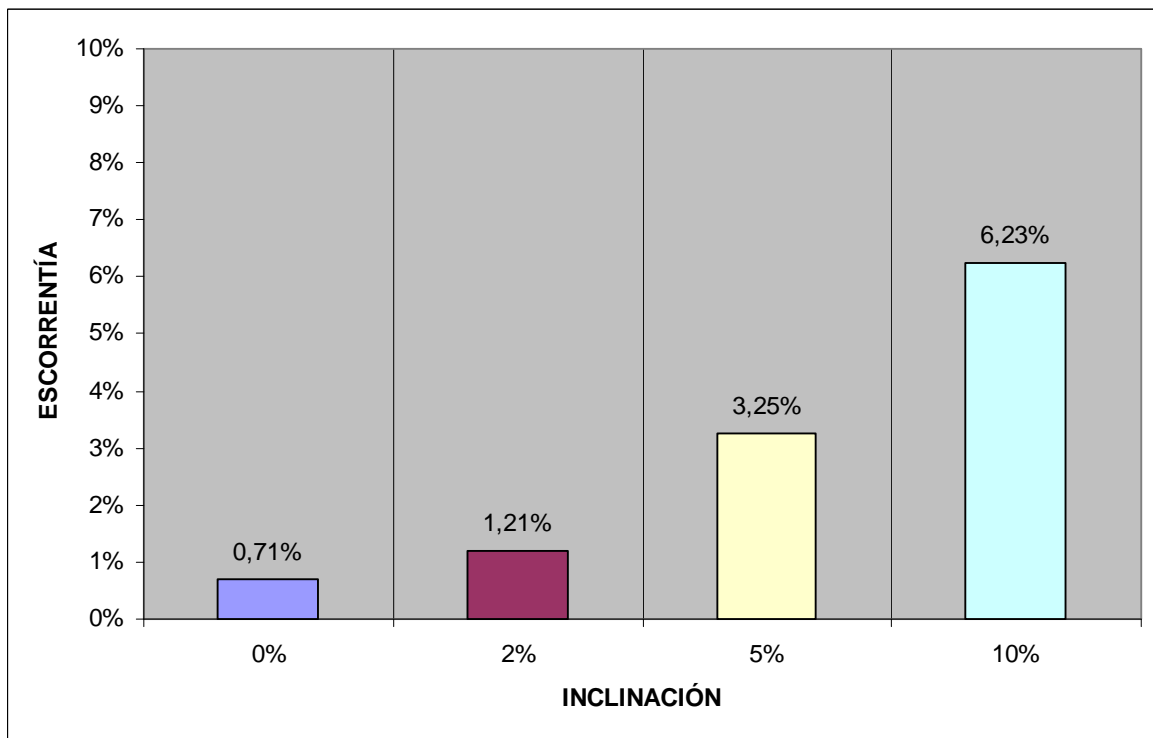
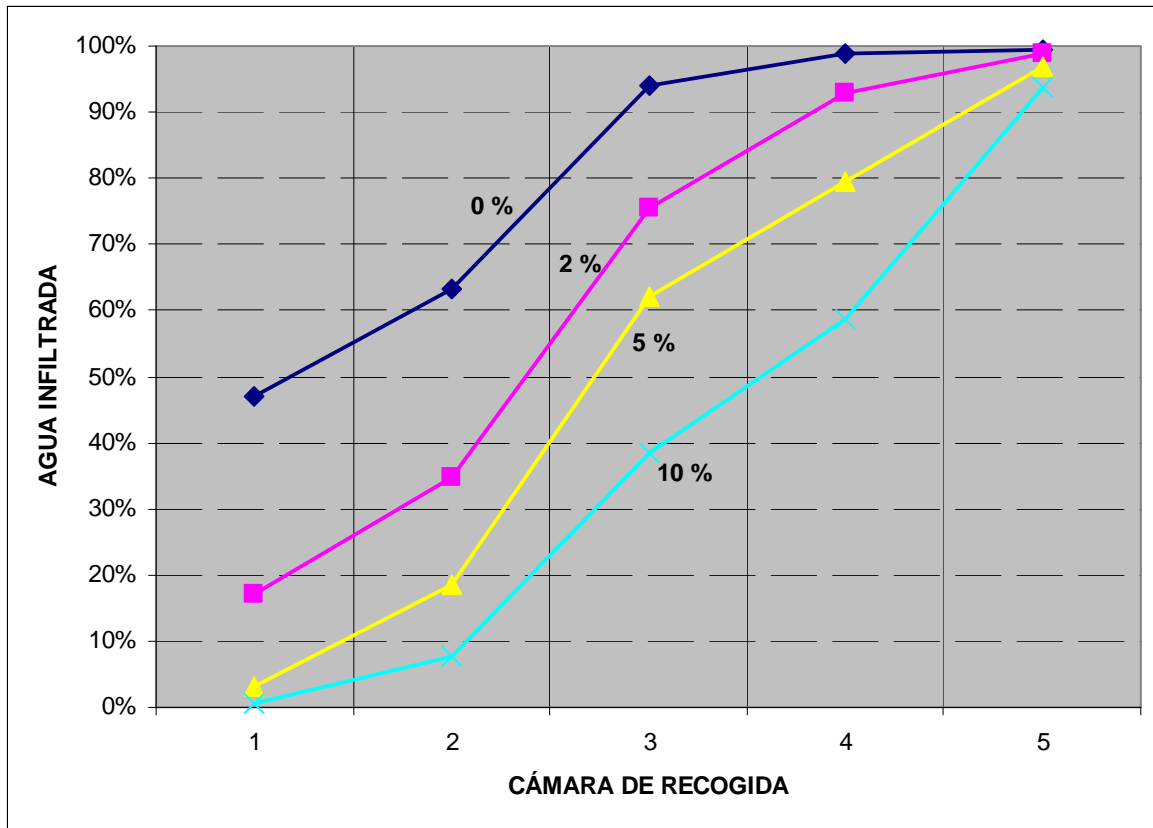


Figura IV-4. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B4 (huevo elíptico) recién colocado.

IV.1.2 SUPERFICIE SEMI-COLMATADA

Con la carga de sedimento de 2 kg/m^2 (500 g sobre la muestra de $0,25 \text{ m}^2$), la Figura IV-5 presenta el porcentaje acumulado de agua infiltrada a lo largo del pavimento y el porcentaje de escorrentía residual correspondientes a la geometría B1. Los porcentajes de partida, recogidos en la cámara 1, son ligeramente inferiores a los correspondientes a la superficie recién colocada, siendo el resto del comportamiento semejante. Tan sólo se observa una mayor influencia de la inclinación en la disminución del agua recogida. El porcentaje de escorrentía más alto está asociado a la inclinación máxima y es del 6,5%.

Los porcentajes de infiltración y escorrentía correspondientes a la geometría B2 se recogen en la Figura IV-6. Los resultados de la superficie semi-colmatada son mejores para las dos primeras cámaras y las dos primeras pendientes que los de la misma superficie recién colocada, siendo el punto más extremo el correspondiente a la cámara 1 con el 2% de inclinación. Esta tendencia contradictoria se corrige a partir en la cámara 3 y no se observa en las pendientes del 5% y del 10%, donde se registran menores porcentajes de infiltraciones en la superficie semi-colmatada. Por su parte, los valores de la escorrentía residual se duplican, siendo el máximo el 19,8% asociado a la inclinación del 10%.

La Figura IV-7, correspondiente a la geometría B3, muestra una importante reducción del agua recogida en la cámara 1 que puede asociarse a la adición de sedimento. Así, la mayor parte del agua infiltrada se recoge en las cámaras 2 y 3 para la pendiente del 0%, en las cámaras 3 y 4 para las pendientes del 2% y 5%, que presentan comportamientos prácticamente iguales, y en las cámaras 4 y 5 con la inclinación del 10%, cuya escorrentía asciende al 21,1%.

Los resultados obtenidos con la geometría B4 semi-colmatada (Figura IV-8) muestran una buena resistencia a la adición del sedimento pues son semejantes a los obtenidos con la superficie recién colocada. De nuevo, la principal diferencia es una marcada reducción en el volumen recogido por la cámara 1, sobre todo con la superficie plana, y un aumento de la escorrentía, registrándose un máximo de 11,9% con la pendiente del 10%.

En resumen, semi-colmatadas, las geometrías se podrían agrupar en dos grupos: la B1 y B2, con porcentajes altos de agua infiltrada en las cámaras 1 y 2, y la B3 y B4, con mayor importancia de las cámaras 3 y 4. Estas diferencias se deben probablemente al desigual reparto del sedimento en la superficie de la muestra. Para evitar la influencia de la variable reparto, en la comparación entre geometrías tan sólo será válido el valor de infiltración acumulada en las cinco cámaras, valor que corrige las posibles desviaciones observadas en algunas de ellas.

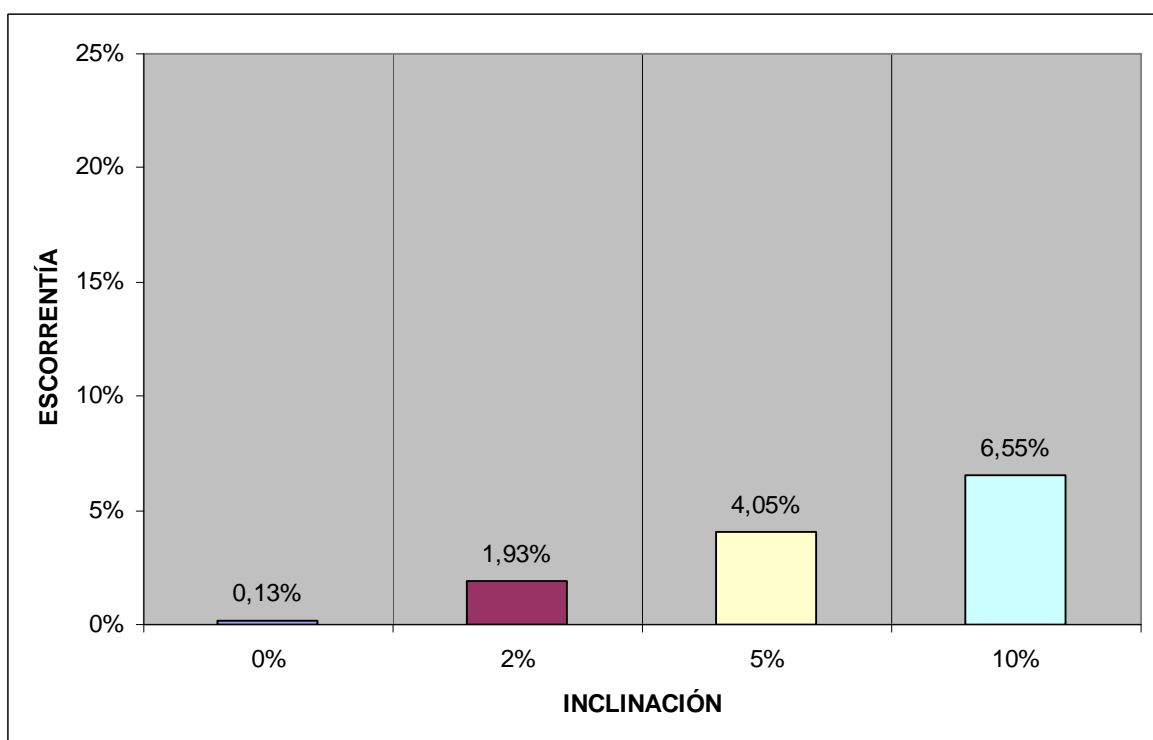
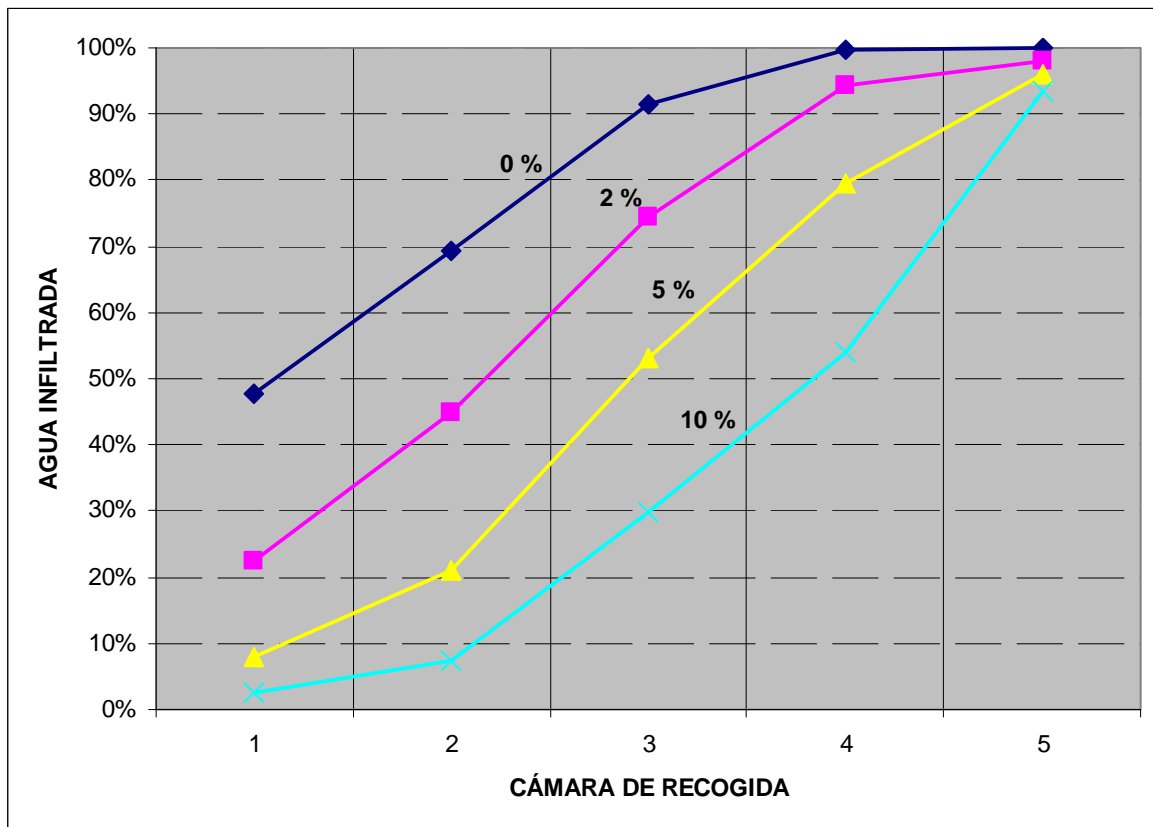


Figura IV-5. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B1 (hueco romboidal) semi-colmatado.

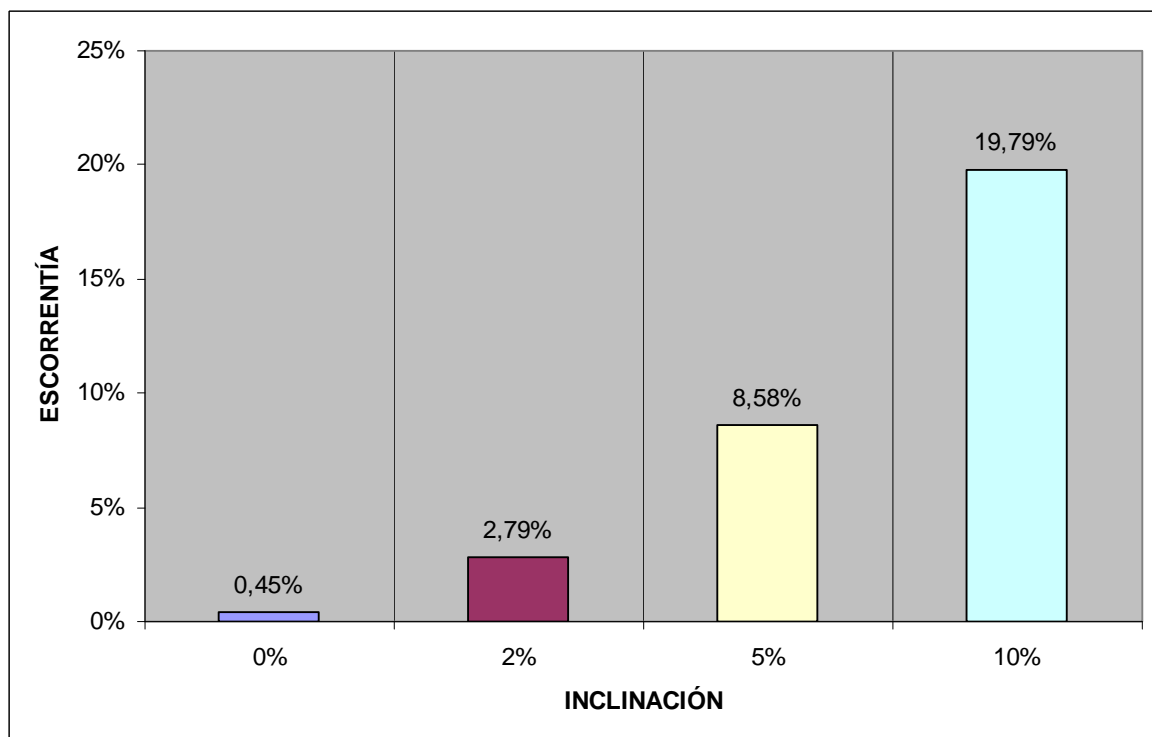
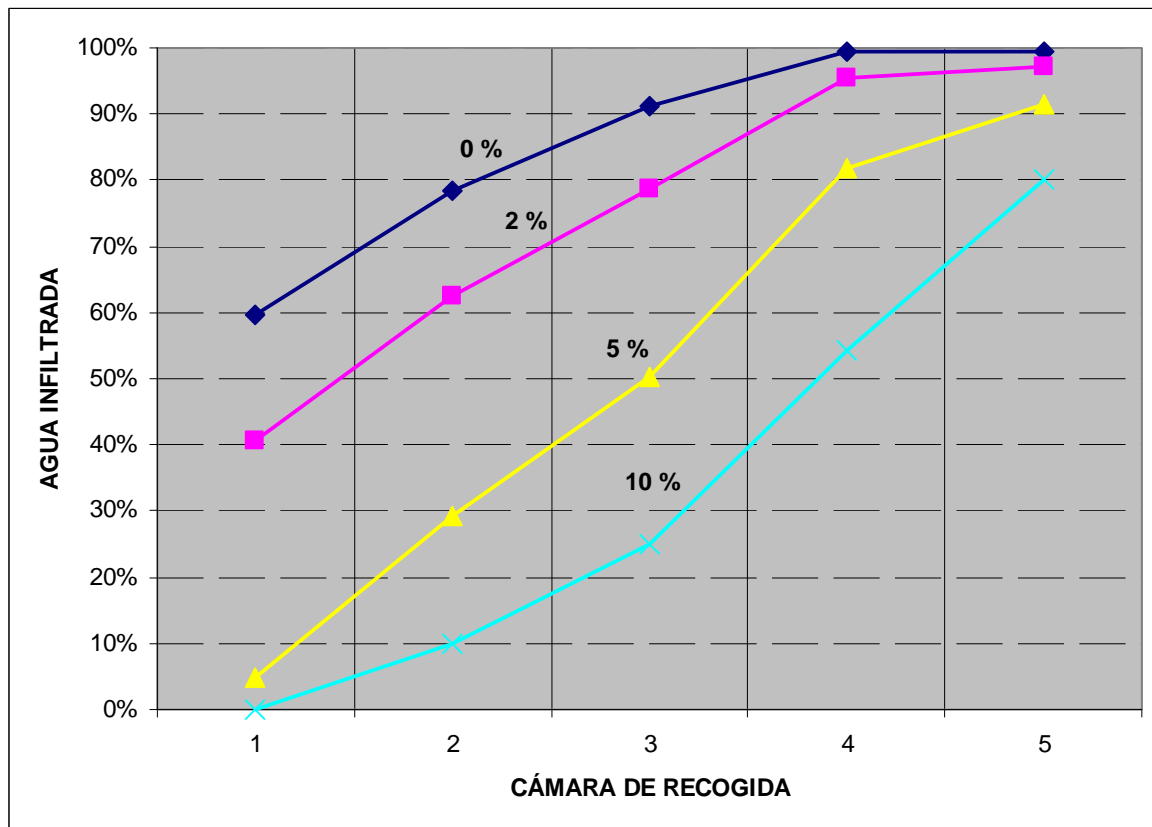


Figura IV-6. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B2 (hueco circular) semi-colmatado.

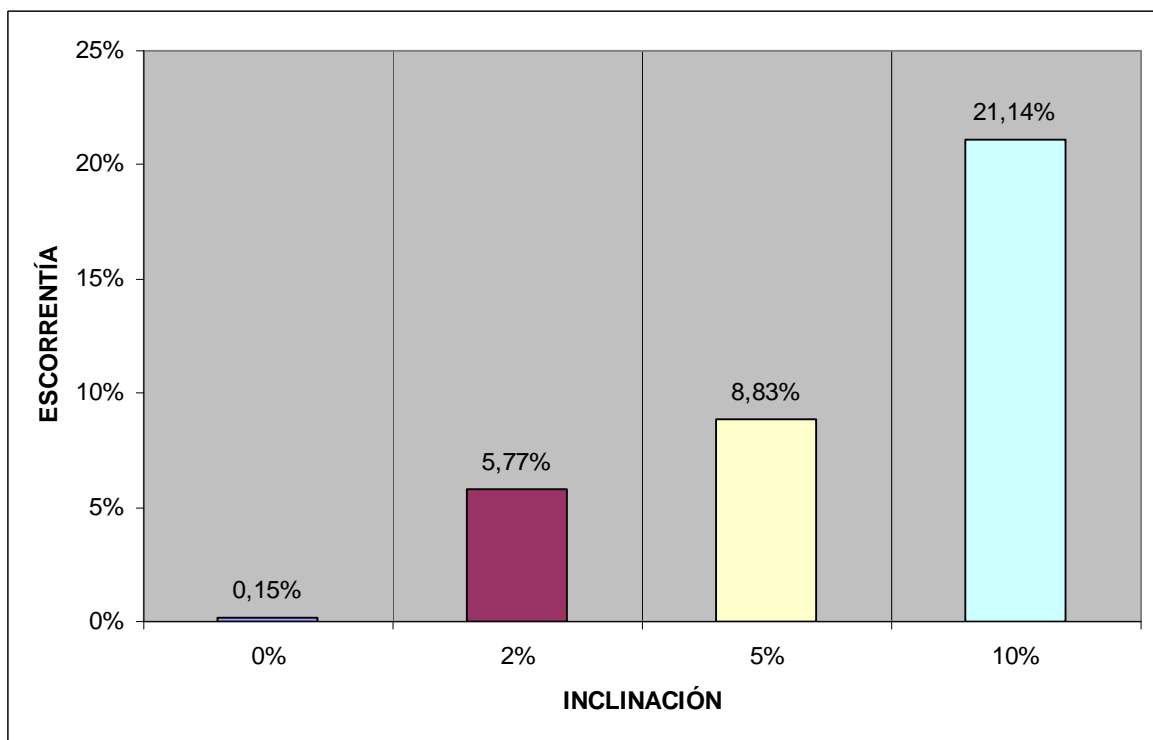
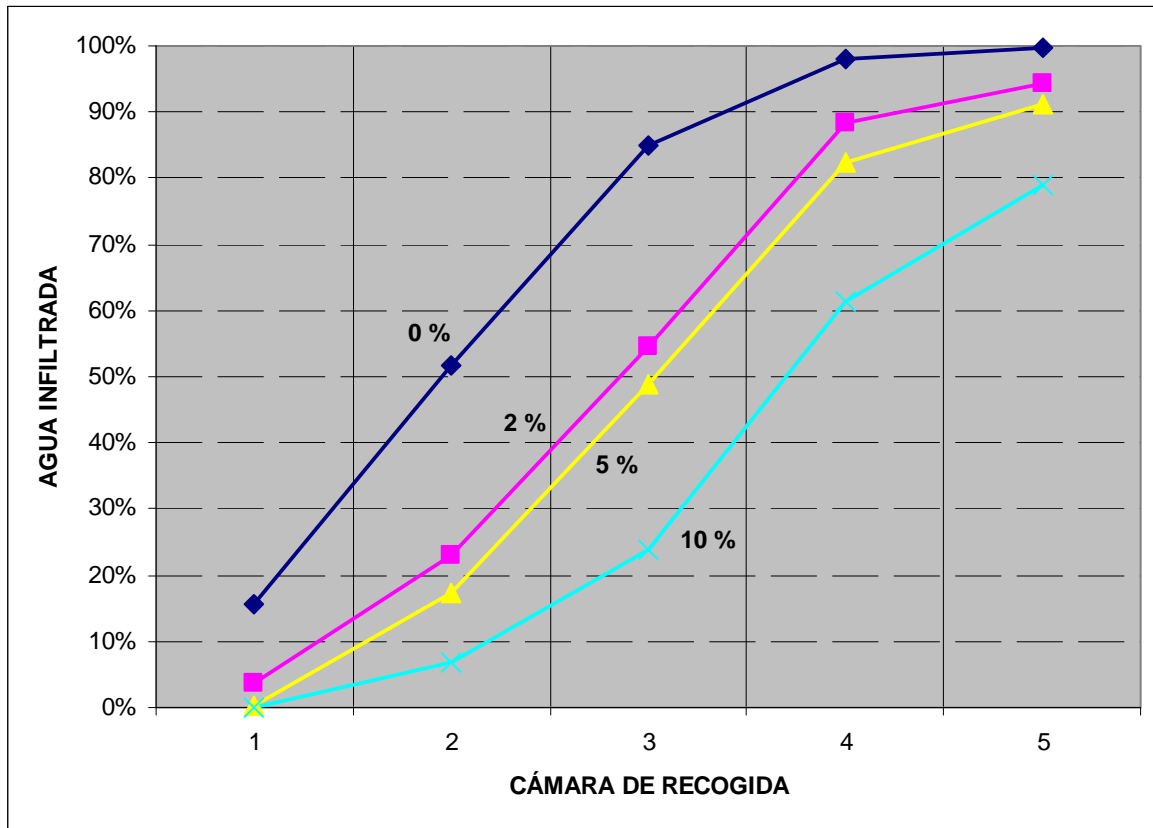


Figura IV-7. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B3 (hueco cuadrado) semi-colmatado.

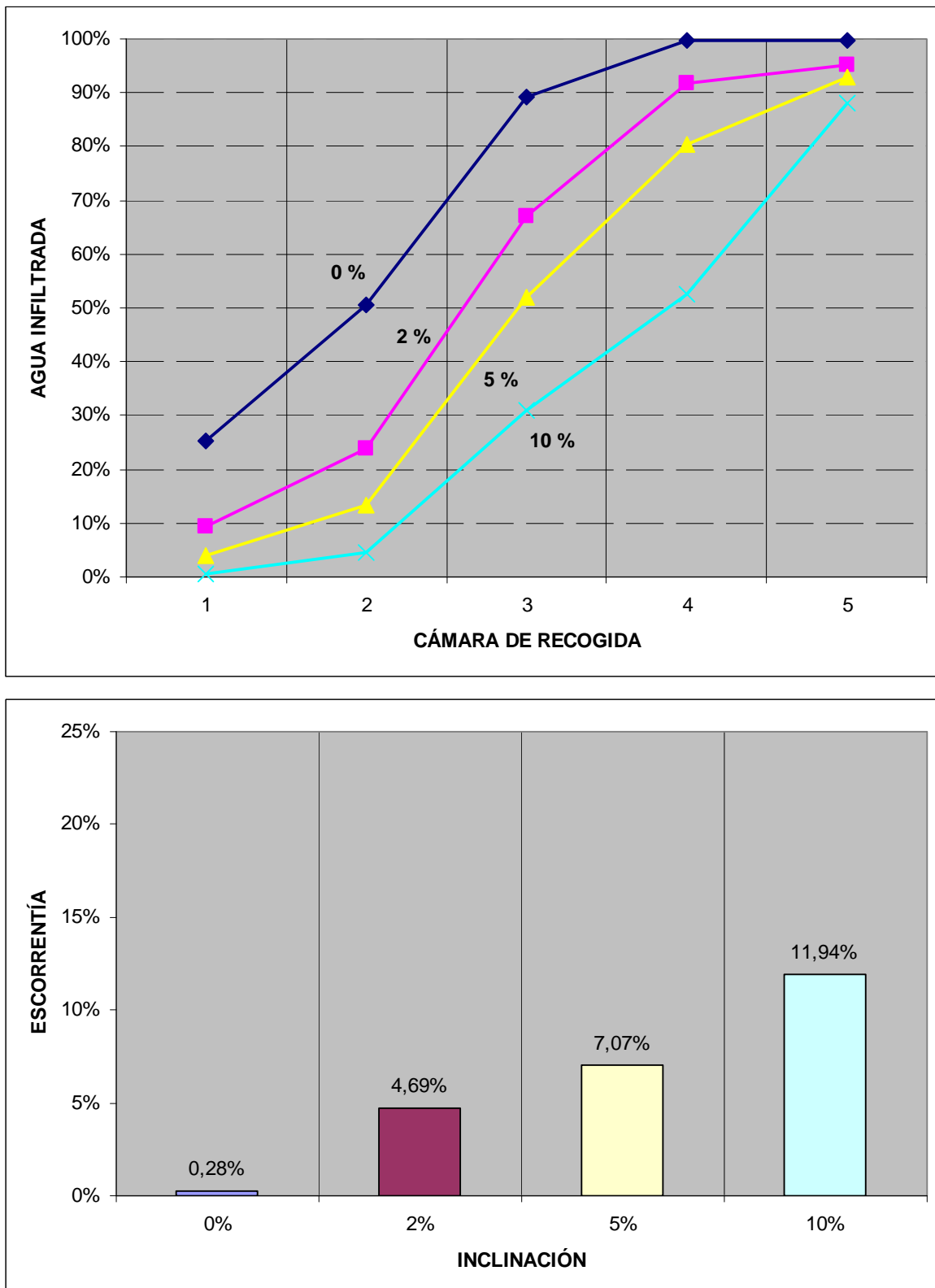


Figura IV-8. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B4 (huevo elíptico) semi-colmatado.

IV.1.3 SUPERFICIE COLMATADA AL MÁXIMO

La Figura IV-9 muestra los resultados de la geometría B1 colmatada al máximo con una carga de sedimento de $3,45 \text{ kg/m}^2$. En esta figura se observa una marcada diferencia entre los porcentajes acumulados de la superficie sin inclinación respecto a los ensayos con superficie inclinada. Así, la inclinación del 0% mantiene una escurrentía por debajo del 1% mientras que para el 10% de inclinación se alcanza un máximo del 74% de escurrentía. El rendimiento medio lo ofrece la inclinación del 2%.

Las respuestas de infiltración y escurrentía correspondientes a la geometría B2 colmatada al máximo con $2,66 \text{ kg/m}^2$ se recogen en la Figura IV-10. En ella se comprueba como los volúmenes recogidos por la cámara 1 son inferiores al 15% en todos los casos. Por su parte, la cámara 3 es la encargada de la mayor parte de la recogida con inclinaciones de 0% y 2%, y la cámara 4 en el caso de pendientes del 5% y 10%. Para las dos pendientes más altas prácticamente coinciden los valores de infiltración total, implicando una escurrentía residual máxima con valores cercanos al 40%. En este caso el valor de escurrentía correspondiente a la inclinación del 10% probablemente se vió disminuido por alguna retención de agua en el borde del marco de la muestra ensayada.

En la Figura IV-11, correspondiente a la geometría B3 colmatada al máximo con una carga de sedimento de $2,48 \text{ kg/m}^2$, se puede observar como, partiendo de valores inferiores al 10% de agua recogida en la cámara 1, se alcanza una infiltración prácticamente del 100% con la superficie plana mientras que se produce una escurrentía de casi un 77% con la inclinación máxima. Con esta inclinación prácticamente toda la infiltración se recoge en las cámaras 4 y 5.

Por último, la Figura IV-12 recoge los resultados obtenidos con la geometría B4 colmatada al máximo con $3,29 \text{ kg/m}^2$. Sin pendiente, la superficie infiltra fundamentalmente a través del centro de la muestra, sobre la cámara de recogida 3. Mientras, en los porcentajes acumulados del 2% y el 5% de inclinación, se produce una superposición en la segunda cámara. Este hecho se debe a una colmatación concentrada que evitó la infiltración sobre la cámara de recogida 2. Por su parte, la cámara 5 vuelve a recoger el máximo con la inclinación del 10%. El valor de escurrentía correspondiente a la inclinación máxima es de 72,2%.

En resumen, debido a las distintas cargas de sedimento empleadas, para realizar la comparación de las diferentes geometrías será necesario expresar los cuatro grupos de resultados en función de una referencia que puede ser la máxima colmatación soportada correspondiente a la geometría B1 con un valor $3,45 \text{ kg/m}^2$.

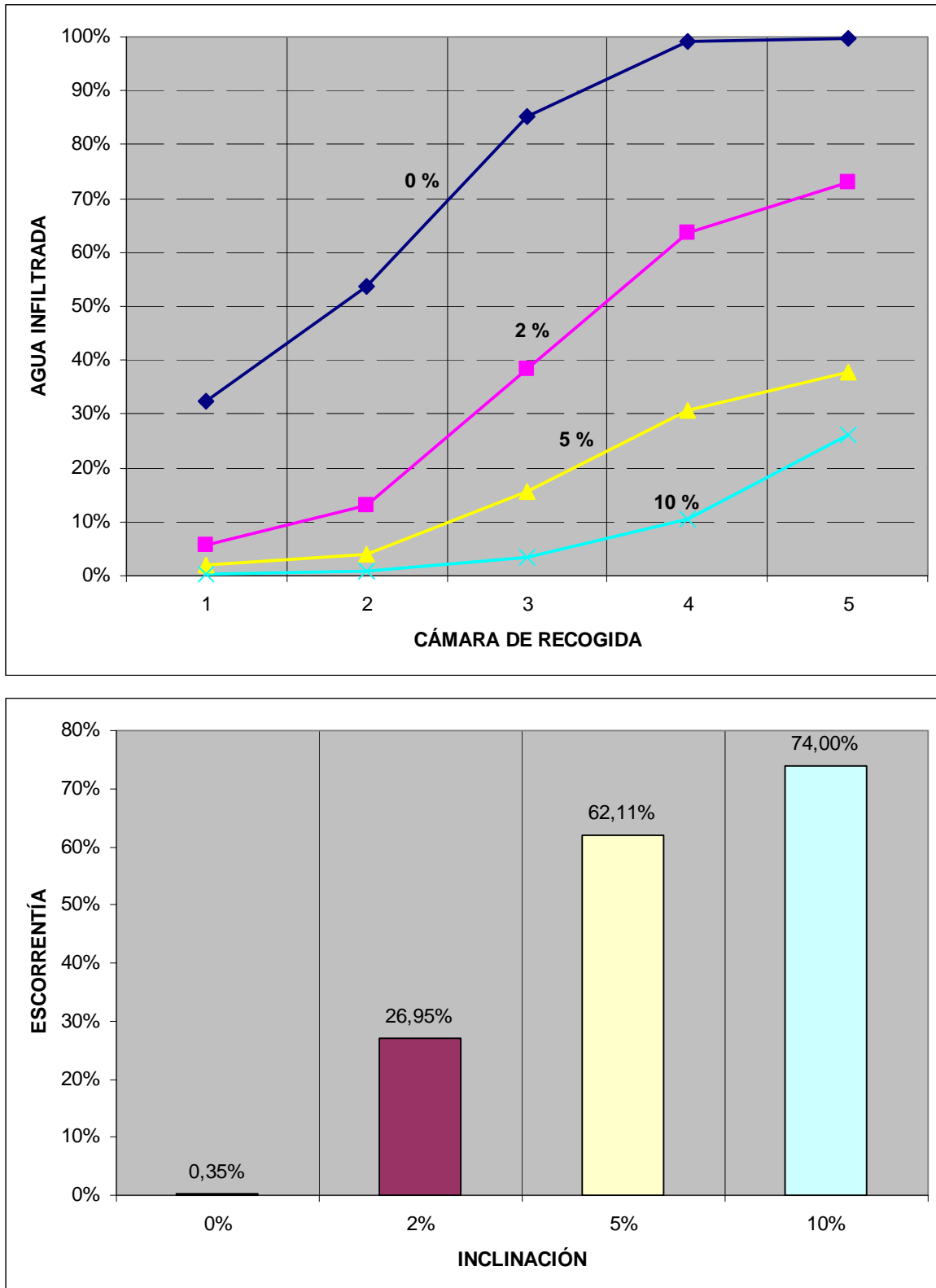


Figura IV-9. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B1 (hueco romboidal) colmatado.

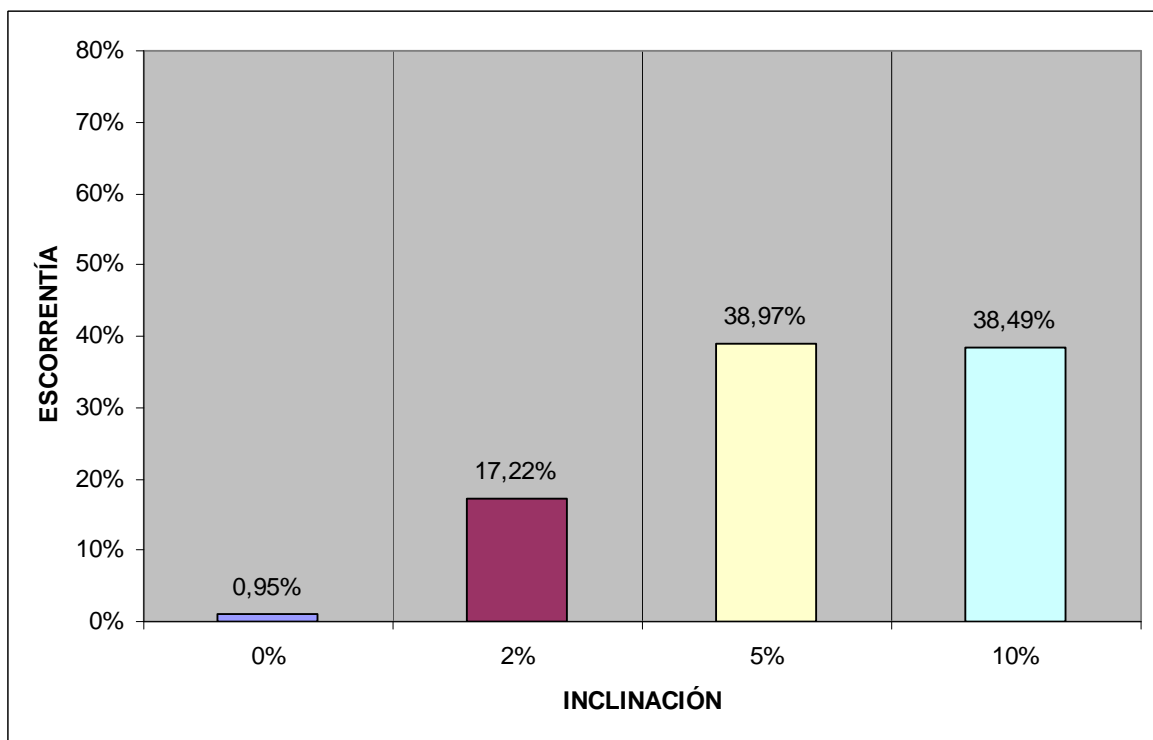
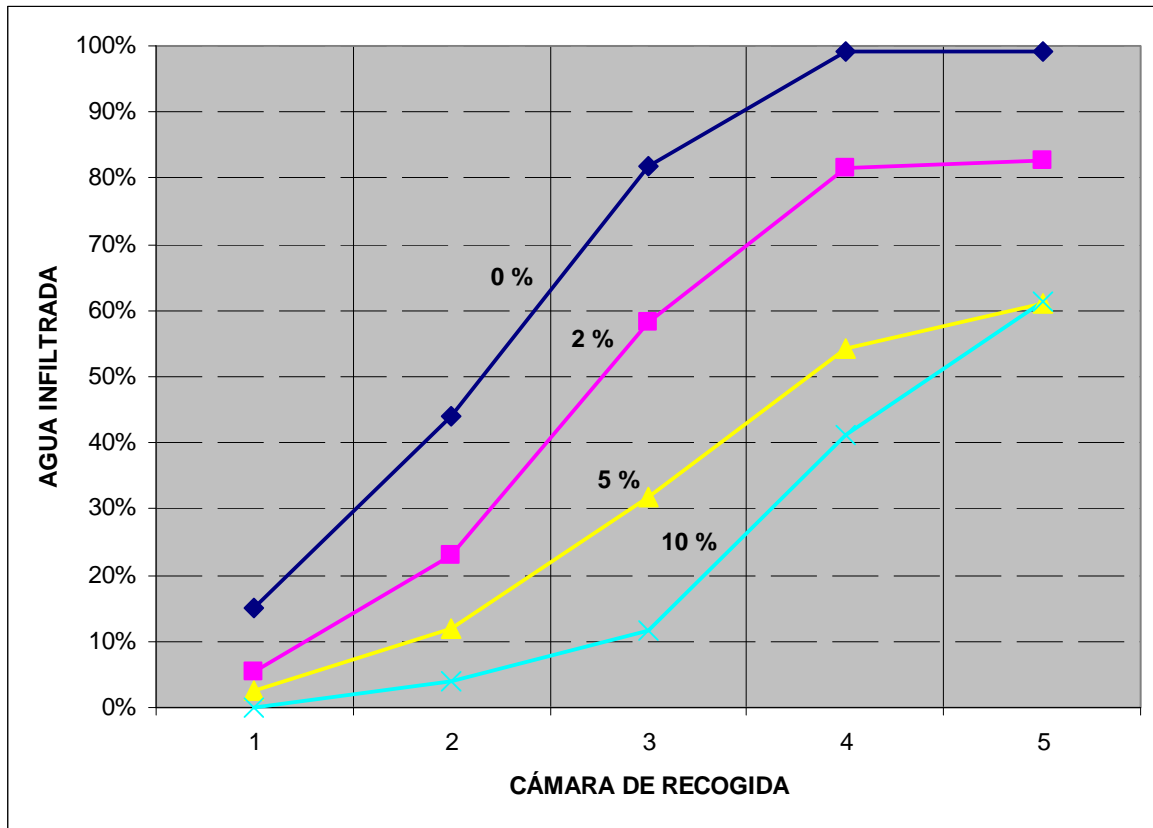


Figura IV-10. Porcentajes de agua infiltrada y de escurrentía según la pendiente para el adoquín tipo B2 (hueco circular) colmatado.

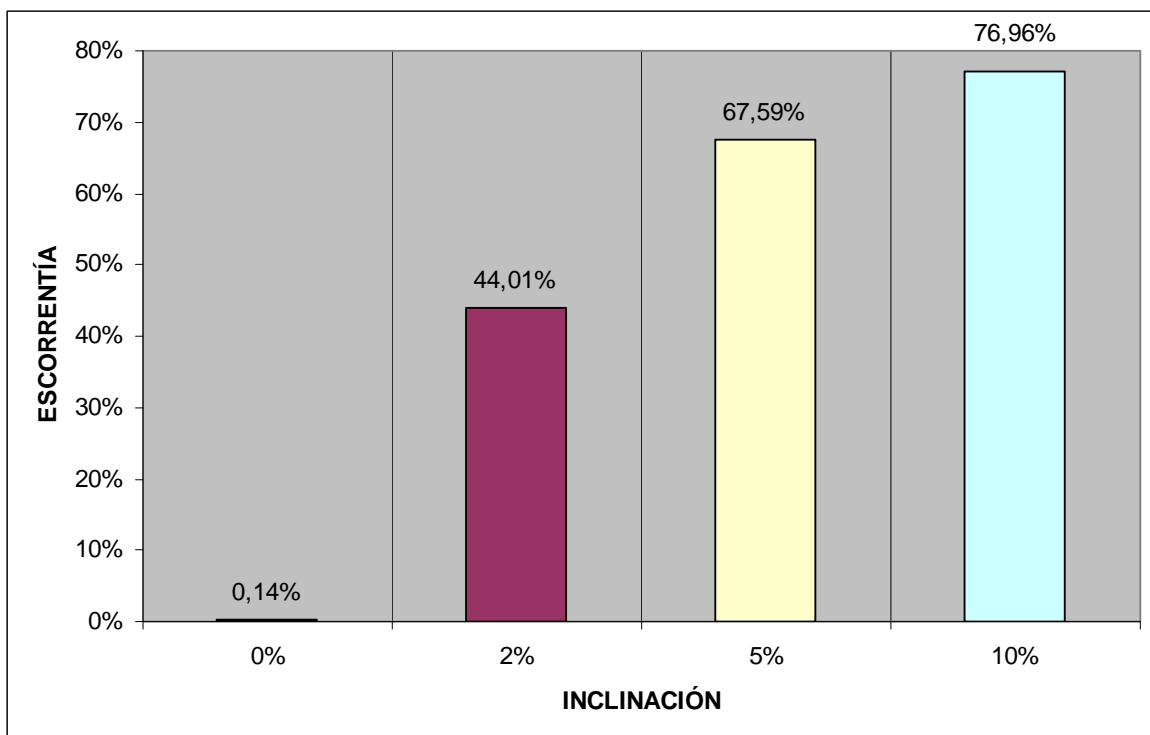
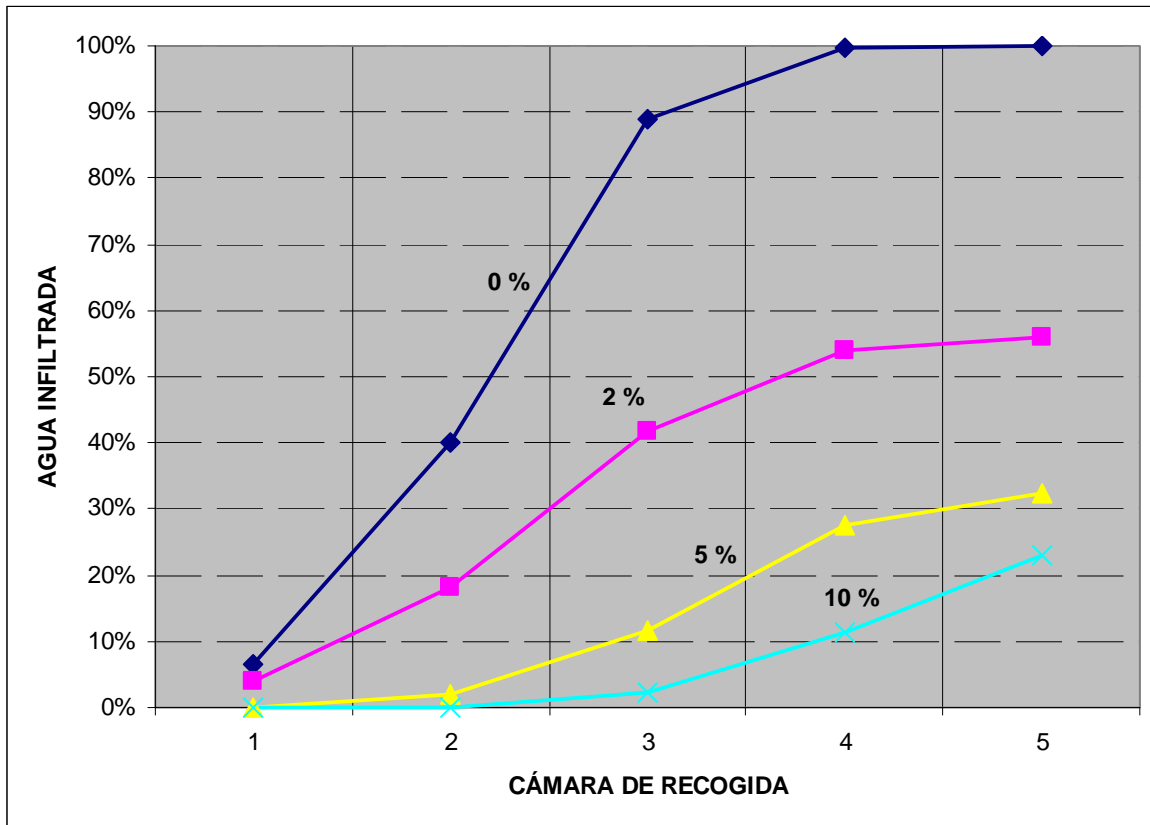


Figura IV-11. Porcentajes de agua infiltrada y de escurrentía según la pendiente para el adoquín tipo B3 (huevo cuadrado) colmatado.

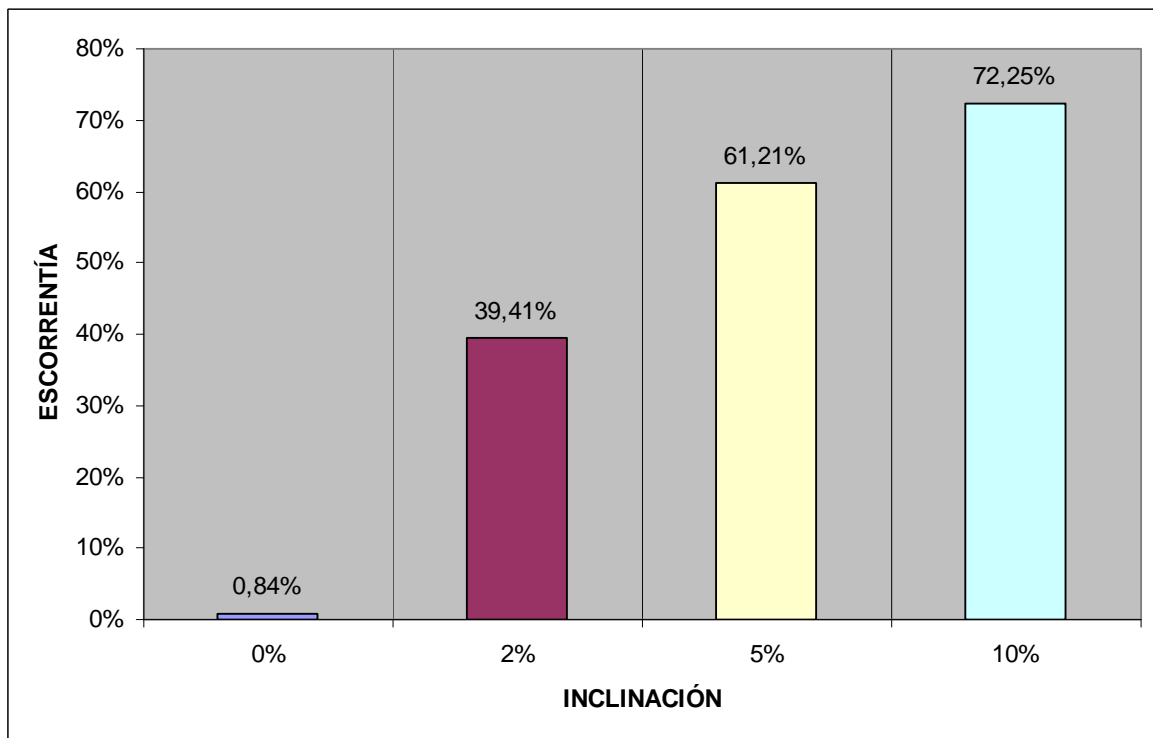
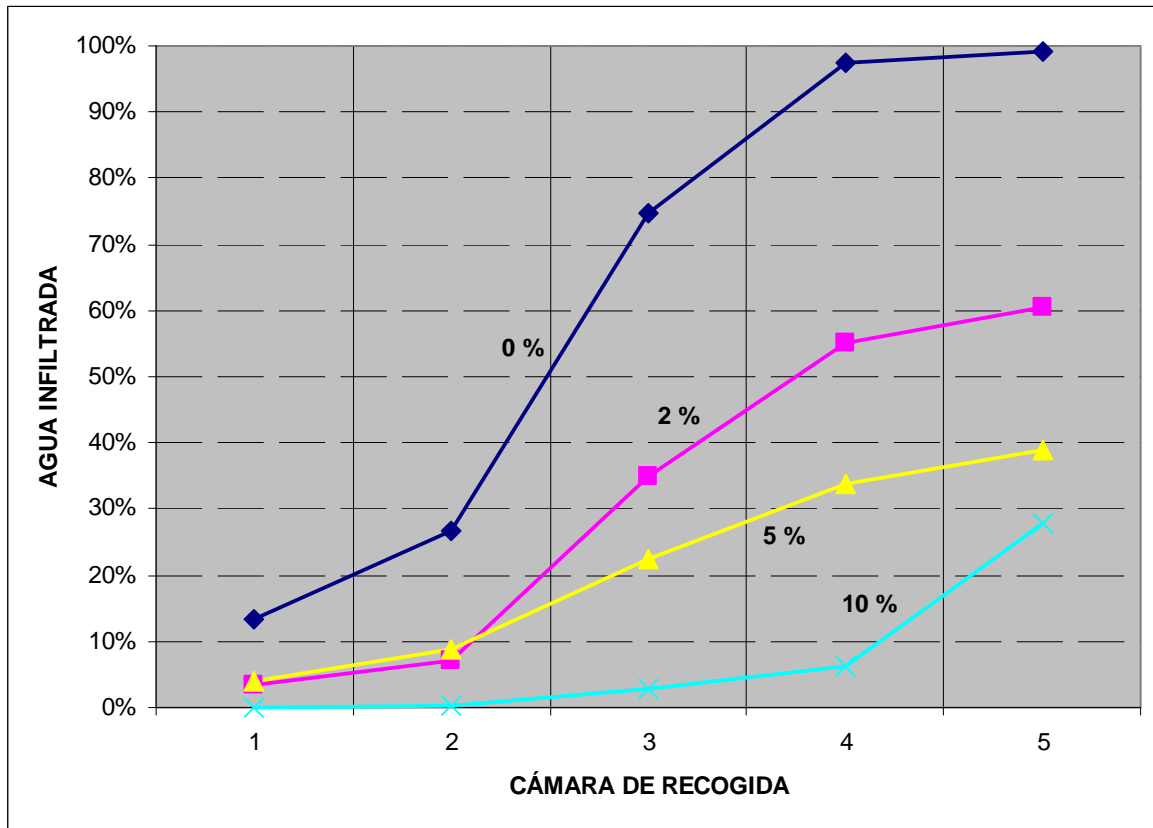


Figura IV-12. Porcentajes de agua infiltrada y de escorrentía según la pendiente para el adoquín tipo B4 (hueco elíptico) colmatado.

IV.1.4 SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE ADOQUÍN ÓPTIMA

La selección de la geometría óptima del adoquín, de entre las cuatro ensayadas, se realiza en base a los resultados de infiltración total acumulada en las cinco cámaras de recogida situadas bajo la muestra de pavimento permeable de adoquines con ranuras. Estos valores corresponden a los ensayos de resistencia a la colmatación realizados con diferentes inclinaciones. Los porcentajes de escorrentía se pueden obtener directamente restando al 100% del agua empleada en el ensayo el correspondiente valor de infiltración total.

La Figura IV-13 muestra los porcentajes de infiltración total correspondientes al pavimento recién colocado, sin ningún problema de colmatación. Así, comparando los valores resultantes de los ensayos de cada geometría, se puede observar que la geometría B1 presenta los mejores resultados para todas las inclinaciones ensayadas. Por su parte, la geometría B4 es la segunda con mejor comportamiento para las pendientes del 2%, 5% y 10%. En comparación de los resultados sin colmatación quedan como peores geometrías la B3 y la B2.

La resistencia a la colmatación comienza a quedar patente al aplicar 500 g de sedimentos sobre las muestras de $0,25 \text{ m}^2$ de pavimento permeable de adoquines. En la Figura IV-14 se muestran los resultados de cada una de las cuatro geometrías en este supuesto. Así, es posible observar como una carga de sedimento de 2 kg/m^2 tiene un efecto perjudicial sobre la capacidad de infiltración. No obstante, la reducción no es crítica en ninguno de los casos, siendo la máxima disminución de la infiltración del 12,70% para la geometría B2 al 10% de inclinación.

Comparando los valores recogidos en la Figura IV-14, se comprueba que la geometría B1 sigue presentando los mejores resultados para todas las inclinaciones ensayadas. Por su parte, la geometría B4 se mantiene como la segunda mejor únicamente con las inclinaciones del 5% y 10%. Para la inclinación del 0% la segunda mejor es la geometría B3 y para el 2% la geometría B2. La peor geometría semi-colmatada con pendientes altas es la B3.

Hasta el momento, la geometría con mayor resistencia a la colmatación es la romboidal, tipo B1, por mantener los mejores valores de infiltración total y sufrir las menores pérdidas relativas, con un máximo de 1,5% de disminución con inclinación del 10%. Le sigue, como segunda mejor, la geometría elíptica o B4, diferenciándose de las dos restantes por su mejor comportamiento en condiciones más exigentes de pendiente. Por el contrario, la geometría que ofrece peores resultados es la cuadrada o B3, a pesar de su buen comportamiento en superficies horizontales.

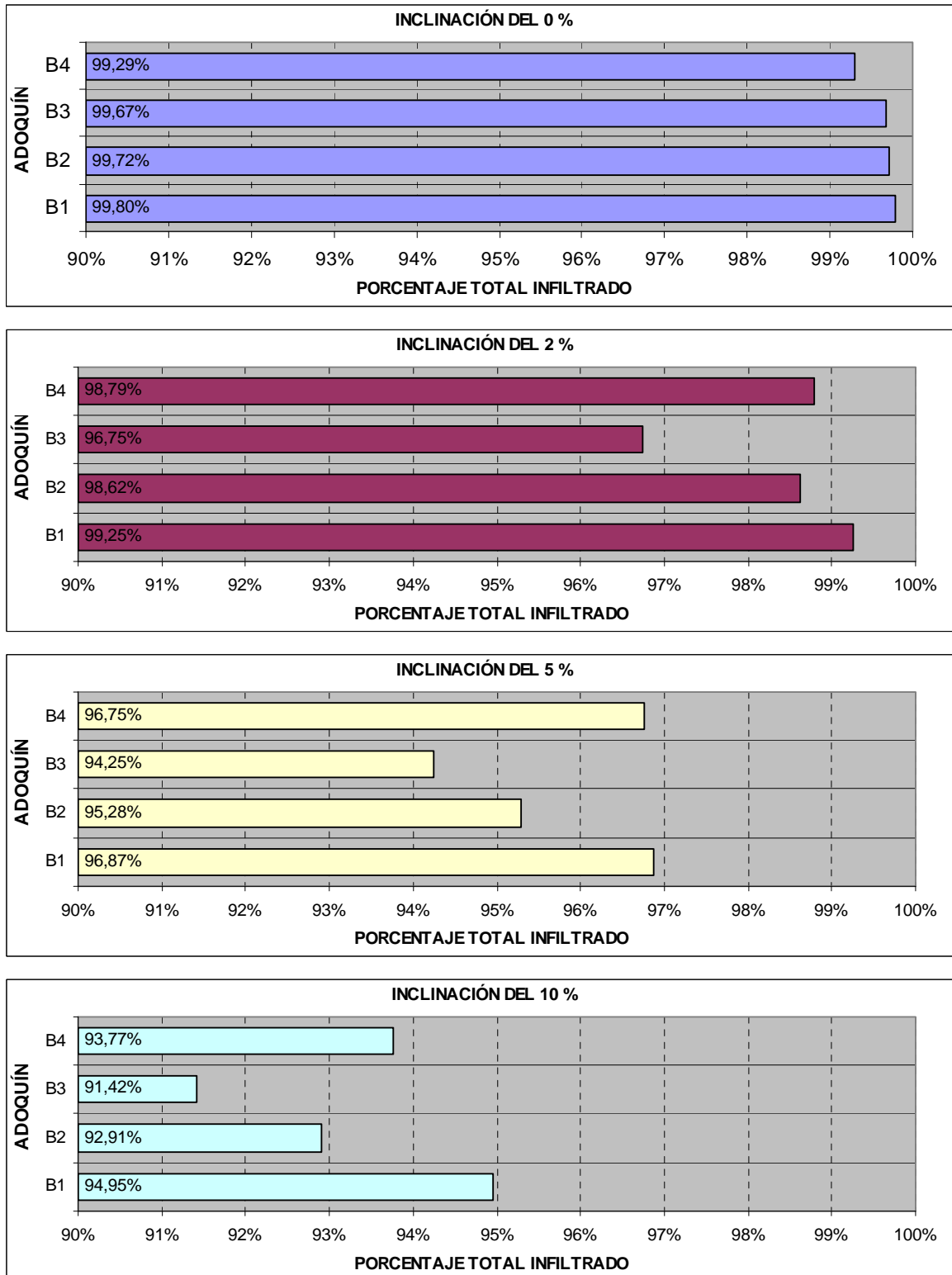


Figura IV-13. Porcentajes totales infiltrados con cada tipo de adoquín recién colocado para cada una de las inclinaciones ensayadas.

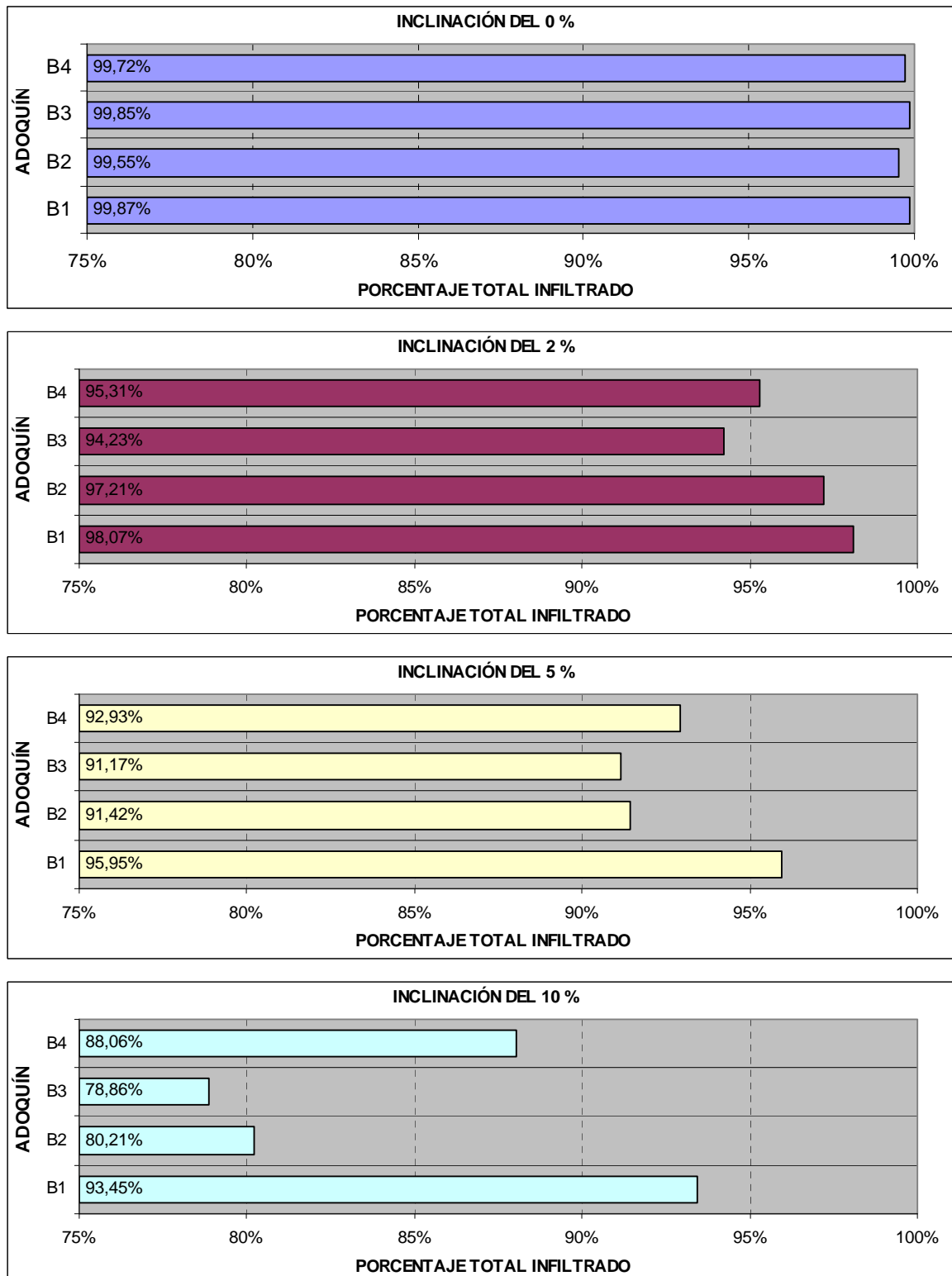


Figura IV-14. Porcentajes totales infiltrados con cada tipo de adoquín semi-colmatado para cada una de las inclinaciones ensayadas.

La Tabla IV-1 presenta la masa de sedimento que fue necesaria, por metro cuadrado, para simular la colmatación máxima en las muestras de pavimentos permeables de adoquines con ranuras, construidas con cada una de las geometrías ensayadas. La mayor capacidad de recibir sedimento, para la misma superficie abierta, corresponde a los bloques con geometrías alargadas de las ranuras, en forma de rombo (B1) o de elipse (B4). Las dos cargas de sedimento necesarias son muy próximas, con una diferencia del 5%, siendo el máximo de 3,45 kg/m², correspondiente a la geometría B1. La menor capacidad de recibir sedimento, o la mayor posibilidad para colmatarse, corresponde a la geometría B3 con una carga de 2,48 kg/m². Además, en la Tabla IV-1, se presentan dos indicadores: el porcentaje por el que la colmatación máxima supera a la colmatación media de 2 kg/m² y el tanto por uno respecto a la máxima carga de sedimento empleada en las cuatro geometrías. Estos dos indicadores sirven para comparar el nivel de colmatación máxima de las cuatro geometrías, bien respecto a la referencia de 2 kg/m², o bien respecto al máximo de 3,45 kg/m². Así, se puede comprobar que el nivel de colmatación media está realmente por encima de la mitad de la colmatación máxima, incluso muy cercano a la misma para la geometría B3. También se puede observar como las geometrías B2 y B3 soportan, de media, un 25% menos de sedimento que las geometrías B1 y B4.

Tabla IV-1. Cantidad de sedimento empleada para la simulación de la colmatación máxima en cada una de las geometrías de adoquines con ranuras ensayadas.

Adoquín	Sedimento empleado para la colmatación (kg/m ²)	Porcentaje por encima de la colmatación media de 2 kg/m ²	Tanto por uno de sedimento respecto al máximo empleado
	A	$100 \times (A - 2) / 2$	A / A_{\max}
B1	3,448	72,4%	1,00
B2	2,660	33,0%	0,77
B3	2,480	24,0%	0,72
B4	3,296	64,8%	0,95

Si se multiplican los resultados de infiltración total obtenidos con cada geometría en el escenario de colmatación máxima por los tanto por uno de sedimento respecto al máximo (Tabla IV-1), se obtiene la Figura IV-15 que permite un cierto grado de comparación ponderada. Así, la geometría B1 continúa siendo la de mejor comportamiento con inclinaciones del 0% y el 2%, mientras que pasa a un segundo lugar, muy igualada con la B4, al aumentar las inclinaciones al 5% y 10%. Es la geometría B2 la que, estando en segundo lugar con 0% y 2% de inclinación, pasa al primer lugar con el 5% y el 10%. Por su parte, la geometría B3 se confirma como la de peor resistencia frente a la colmatación de las cuatro.

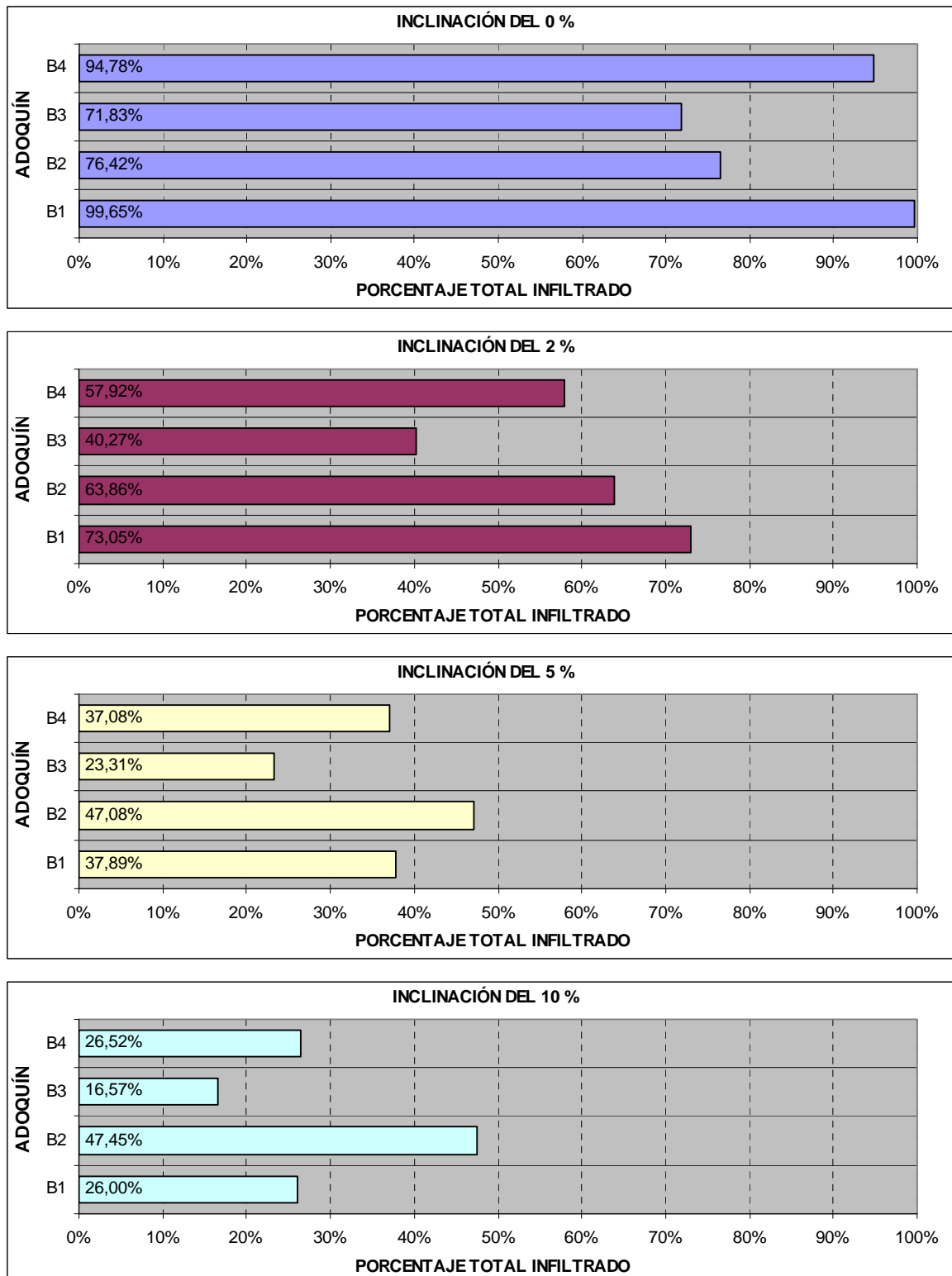


Figura IV-15. Porcentajes totales infiltrados con cada tipo de adoquín colmatado para cada una de las inclinaciones ensayadas, ponderados en función de la cantidad de sedimento empleada.

La Figura IV-16 muestra la distribución de la granulometría del sedimento sobrante de la simulación de la colmatación máxima de las distintas geometrías de adoquines, comparadas con la granulometría inicial del sedimento preparado. En esta figura se observa que las granulometrías correspondientes al sedimento recogido de las geometrías B1, B3 y B4 son muy similares entre sí y a la granulometría de partida. Mientras, la granulometría asociada al sedimento sobrante de la colmatación de la superficie construida con la geometría B2 destaca por tener un mayor contenido de partículas menores de 1 mm que la referencia. Esto significa que dichas partículas no fueron empleadas en el proceso de colmatación, dejando por tanto huecos libres entre las partículas mayores que pudieron facilitar el proceso de infiltración ofreciendo resultados mejores, pero no comparables con el resto de las geometrías. Esta es una posible explicación de los resultados especialmente buenos registrados con la geometría B2 en el caso de superficie colmatada al máximo.

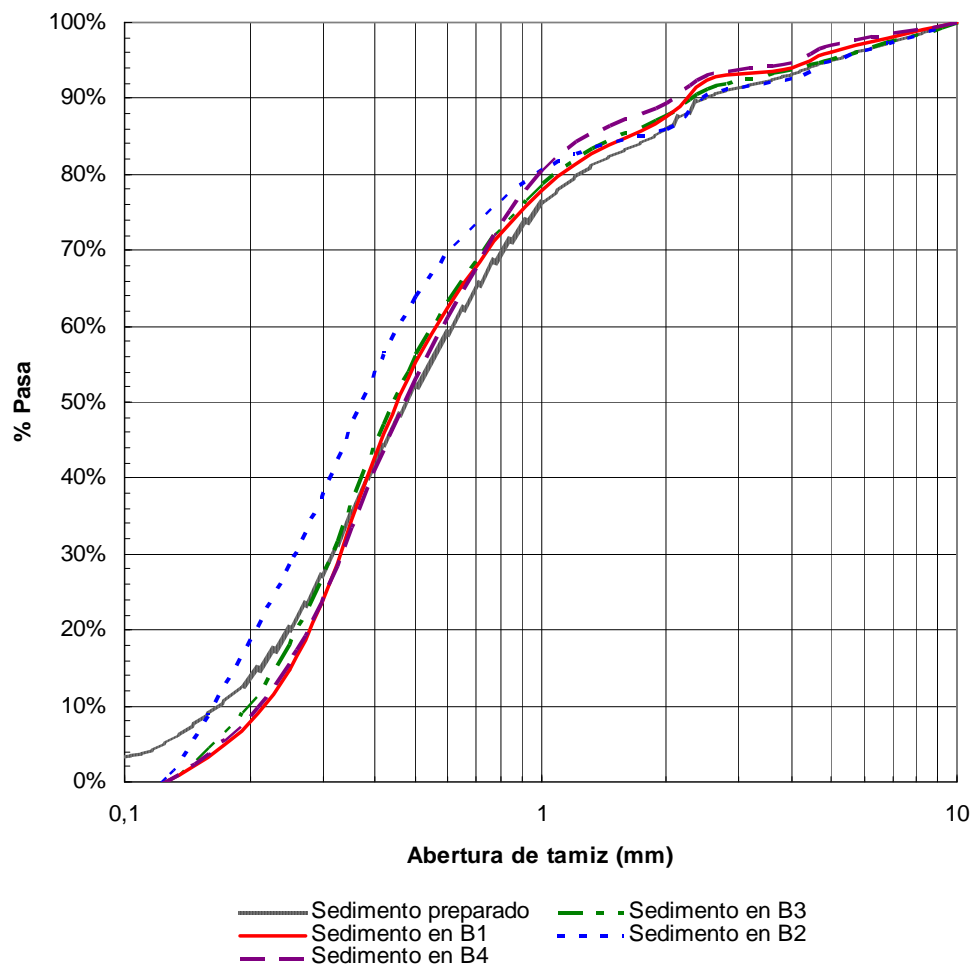


Figura IV-16. Granulometrías del sedimento sobrante de la simulación de la colmatación con cada tipo de adoquín ensayado.

Con todo, para la comparación final de las geometrías es necesario dar un valor

numérico al parámetro de resistencia a la colmatación (RC) que resume los ensayos realizados. Entre las propuestas de cálculo de este parámetro, se desestiman el promedio directo, e incluso el promedio ponderado, de todas infiltraciones medidas con las cuatro inclinaciones en los tres estados de colmatación ensayados por considerarse poco representativos de la resistencia a la colmatación e implicar la realización de todos los ensayos. Así, para facilitar la repetitividad del ensayo y la interpretación del parámetro RC, se decidió asignarle el valor del promedio de la infiltración total obtenida con las cuatro inclinaciones con una carga de sedimento de 2 kg/m² (escenario común de semi-colmatación), multiplicado con el tanto por uno de sedimento utilizado para simular la colmatación respecto al máximo de comparación (sedimento de cada geometría respecto al máximo de las cuatro). Las componentes del parámetro RC y sus valores calculados quedan recogidos en la Tabla IV-2.

Tabla IV-2. Obtención del parámetro de resistencia a la colmatación (RC) de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras ensayadas.

Parámetro		Geometría del hueco o ranura			
		Romboidal (B1)	Circula r (B2)	Cuadrada (B3)	Elíptica (B4)
Promedio de infiltración con la carga de sedimento de 2 kg/m ²	A	96,8%	92,1%	91,0%	94,0%
Tanto por uno de sedimento respecto al máximo	B	1	0,77	0,72	0,95
Resistencia a la colmatación (RC)	AxB	97%	71%	65%	90%

El promedio de infiltración en el estado de semi-colmatación permite la comparación directa del rendimiento de las diferentes geometrías bajo las mismas condiciones de colmatación. Mientras, el tanto por uno de sedimento utilizado para simular la colmatación máxima, respecto al máximo de las cuatro geometrías a comparar, permite la jerarquización de las geometrías de mayor a menor vida útil sin mantenimiento. Así, la geometría de referencia con la mayor capacidad de recepción de sedimento, tipo B1, sería aquella que tardaría más tiempo en colmatarse, para un mismo aporte de sedimentos en el tiempo. De este modo son tenidas en cuenta las diferencias en las cargas de sedimento necesarias para simular la colmatación máxima. Este valor está directamente relacionado con la geometría de las ranuras a bloquear debido a la limitación de la penetración de partículas de diferentes tamaños y la influencia en las disposiciones de las mismas en el interior de los huecos, los cuales contaban en los cuatro casos con prácticamente el mismo volumen a ocupar.

En la Tabla IV-3 se recoge un resumen de los parámetros que se consideraron para caracterizar las cuatro geometrías de adoquines, completados con los valores obtenidos de la resistencia a colmatación (RC) en laboratorio. Se tienen de este modo dos parámetros de capacidad de infiltración (Tabla III-2), dos parámetros de capacidad portante (Tabla III-3) y dos parámetros de estética y comodidad (Tabla III-4) para evaluar cual de las geometrías de adoquines ofrece un comportamiento mejor. Estos seis parámetros deben ser tenidos en cuenta por igual para obtener una solución que equilibre funcionalidad, durabilidad y comodidad. Este proceso de selección sin ponderación equivale a considerar con el mismo peso en el diseño los tres pilares del desarrollo sostenible: medio ambiente, economía y sociedad. Por tanto, queda claro que el parámetro de resistencia a la colmatación (RC), aún concentrando toda la importancia de la evaluación de la funcionalidad puesto que los adoquines comparados cuentan prácticamente con la misma superficie de infiltración, no debe tener más peso que el resto, no siendo suficiente por sí sólo para realizar una selección equilibrada.

Tabla IV-3. Parámetros de caracterización y promedio de comparación de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras estudiadas.

Parámetro de caracterización	Geometría del hueco o ranura			
	Romboidal (B1)	Circular (B2)	Cuadrada (B3)	Elíptica (B4)
Superficie de Infiltración (SI)	99%	100%	99%	100%
Resistencia a la colmatación (RC)	97%	71%	65%	90%
Perímetro de Contacto (PC)	60%	84%	80%	68%
Ancho Mínimo (AM)	90%	84%	80%	92%
Valoración del fabricante (JV)	95%	75%	65%	95%
Comodidad de tránsito (CT)	67%	47%	33%	73%
PROMEDIO	85%	77%	70%	86%

Analizando los diferentes parámetros de caracterización y resultados de la resistencia a la colmatación (Tabla IV-3), se observa como los mínimos se reparten de la siguiente manera: mínima resistencia a la colmatación (65%) correspondiente a la geometría B3, mínimo perímetro de contacto (60%) correspondiente a la geometría B1, mínimo ancho útil (80%) correspondiente a la geometría B3, mínima valoración del fabricante (65%) correspondiente a la geometría B3 y mínima comodidad de tránsito (33%) correspondiente a la geometría B3. La geometría B3 se confirma como la pésima con cuatro valores mínimos de seis parámetros. Mientras, las geometrías B2 y B4 no presentan ningún valor mínimo, si bien el valor de la comodidad al tránsito de la geometría B2 es significativamente bajo.

Finalmente, evaluando el promedio global de los seis parámetros considerados, las geometrías B1 y B4 son las que ofrecen un mejor comportamiento global con valores muy similares. Sin embargo, es la geometría B4 la que no presenta ningún mínimo y ofrece un mayor promedio, debido a sus mejores características resistentes y de comodidad. Por tanto, comparando el adoquín B4 con el B1, el primero ofrece una mayor superficie de contacto (68% frente al 60% del B1) y un menor ancho de ranura, lo cual se traduce en una mayor comodidad de tránsito (73% frente al 67% de la B1). Consecuentemente, aún por muy poca diferencia, la geometría seleccionada como óptima entre las cuatro ensayadas es la B4, correspondiente al adoquín rectangular con ranuras elípticas (Figura IV-17).

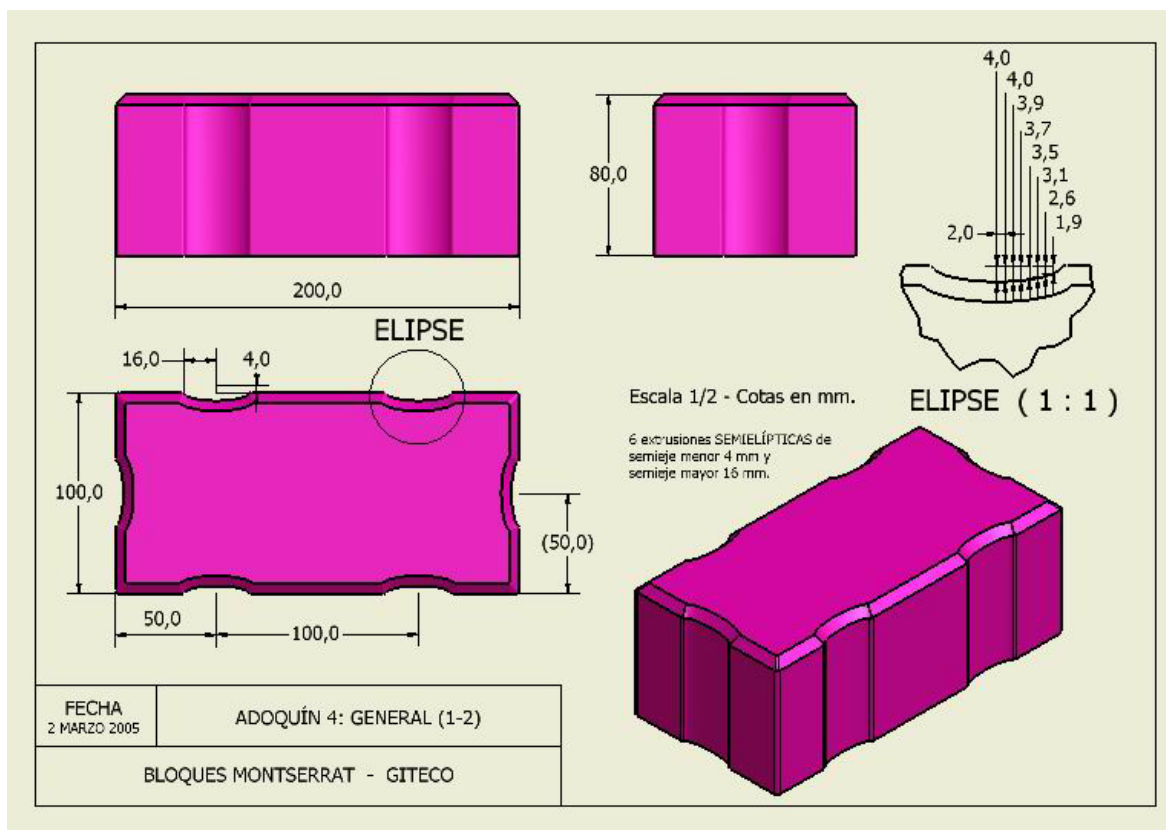


Figura IV-17. Geometría del adoquín con ranuras seleccionada como óptima.

IV.1.5 CONCLUSIONES PARCIALES

Del análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la colmatación de las cuatro geometrías de adoquines con ranuras, se extraen las siguientes conclusiones parciales:

- La capacidad de infiltración es menor cuanto mayor es la carga de sedimentos sobre la superficie, ya que estos bloquean los canales disponibles para la infiltración.
- La capacidad de infiltración también es menor cuanto mayor es la inclinación de la superficie, debido a que disminuye el tiempo de estancia del agua en un punto que permite la infiltración en dicho punto.
- Una carga de sedimento de $2,0 \text{ kg/m}^2$ tiene un efecto perjudicial, pero no crítico, sobre la capacidad de infiltración de un pavimento permeable de adoquines con ranuras de 8 cm de espesor.
- Las cargas de sedimento necesarias para simular la colmatación están directamente relacionadas con la geometría de las ranuras a bloquear, la cual puede limitar la penetración de partículas de mayor tamaño e influir en la disposición del sedimento en el interior de los huecos.
- Las geometrías de adoquines para pavimentos permeables que ofrecen una mayor resistencia a la colmatación son aquellas con ranuras alargadas y estrechas, romboidales o elípticas.
- Los adoquines para pavimentos permeables de 20 cm x 10 cm x 8 cm con 6 cm^2 de superficie en planta libres para infiltración no se colmatan totalmente hasta acumular cargas de sedimento sobre la superficie en torno a los 3 kg/m^2 .
- El ensayo de resistencia a la colmatación con el ICF (Infiltrómetro Cántabro Fijo) aplicado a pavimentos permeables de adoquines permite la comparación de la capacidad de infiltración y la evaluación del efecto del aporte de sedimentos a la superficie.
- Para las cuatro geometrías de adoquines con ranuras ensayadas, los porcentajes de infiltración mínimos se dan con la inclinación máxima del 10% y son del 91% sin carga de sedimento, del 79% con una carga de sedimento de $2,0 \text{ kg/m}^2$, y del 17% con la superficie colmatada al máximo.
- El diseño de adoquines para pavimentos permeables se debe realizar considerando la resistencia a la colmatación de la superficie permeable como un parámetro de igual importancia que los que representan la capacidad para transmitir cargas o la comodidad del tránsito de la superficie resultante.

IV.2 RESISTENCIA A LA COLMATACIÓN DE PAVIMENTOS PERMEABLES

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la colmatación de pavimentos permeables de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa están recogidos en el primer apartado del *Anexo 2: Resistencia a la colmatación de pavimentos permeables*. Ambos pavimentos permeables fueron sometidos a la acción simultánea de precipitación directa y entrada de escorrentía superficial. Las intensidades de los aguaceros simulados de treinta minutos fueron ajustadas entre 45 mm/h y 55 mm/h, correspondiendo con periodos de retorno de 10 y 20 años, respectivamente, en Santander. Las inclinaciones de ensayo fueron: 0%, 2%, 5%, 8% y 10%.

IV.2.1 ADOQUINES CON RANURAS

El adoquín para pavimentos permeables estudiado fue el diseñado para Bloques Montserrat. Este es un adoquín con ranuras elípticas y 10 cm de espesor, 2 cm más que los prototipos analizados en el apartado anterior.

IV.2.1.1 Superficie recién colocada

La Figura IV-18 recoge los promedios del porcentaje recogido en cada cámara inferior del ICF respecto al total. Así, se puede observar claramente como la cantidad de agua recogida en las cámaras 1 y 3, situadas al inicio del pavimento permeable, disminuye al aumentar la inclinación del modelo. La cámara 2 muestra la misma tendencia interrumpida por el resultado correspondiente a la pendiente del 8%. Mientras, la cámara 4 refleja la transición hacia las cámaras 5 y 6, donde queda reflejada la tendencia contraria pues, al aumentar la pendiente, aumenta la cantidad de agua recogida en la parte final del pavimento. Para el escenario 1, superficie recién colocada, no existe apenas escorrentía recogida en la cámara 6 para el 0% de inclinación, lo cual significa que no se produce ninguna acumulación superficial de agua. Mientras, los valores de escorrentía para las pendientes intermedias de 2%, 5% y 8% se mantienen en torno al 10% y el mayor porcentaje recogido corresponde al 16% con la inclinación del 10%.

Para completar el análisis de los resultados se emplea el concepto de longitud de máximo drenaje introducido por González Angullo (2005). Las longitudes de máximo drenaje, entendidas como la distancia desde el comienzo de la superficie permeable (parte alta por la que entra en lámina libre la escorrentía superficial) hasta la cámara con el máximo porcentaje de agua recogida, son de 10 cm para la inclinación del 0%, 30 cm para el 2%, 5% y 8%, y 50 cm para el 10%. La longitud de máximo drenaje puede asimilarse a la distancia a partir de la

cual no hay escorrentía superficial, habiéndose infiltrado la escorrentía de entrada simulada y no generándose nueva escorrentía por la precipitación directa simulada sobre la superficie.

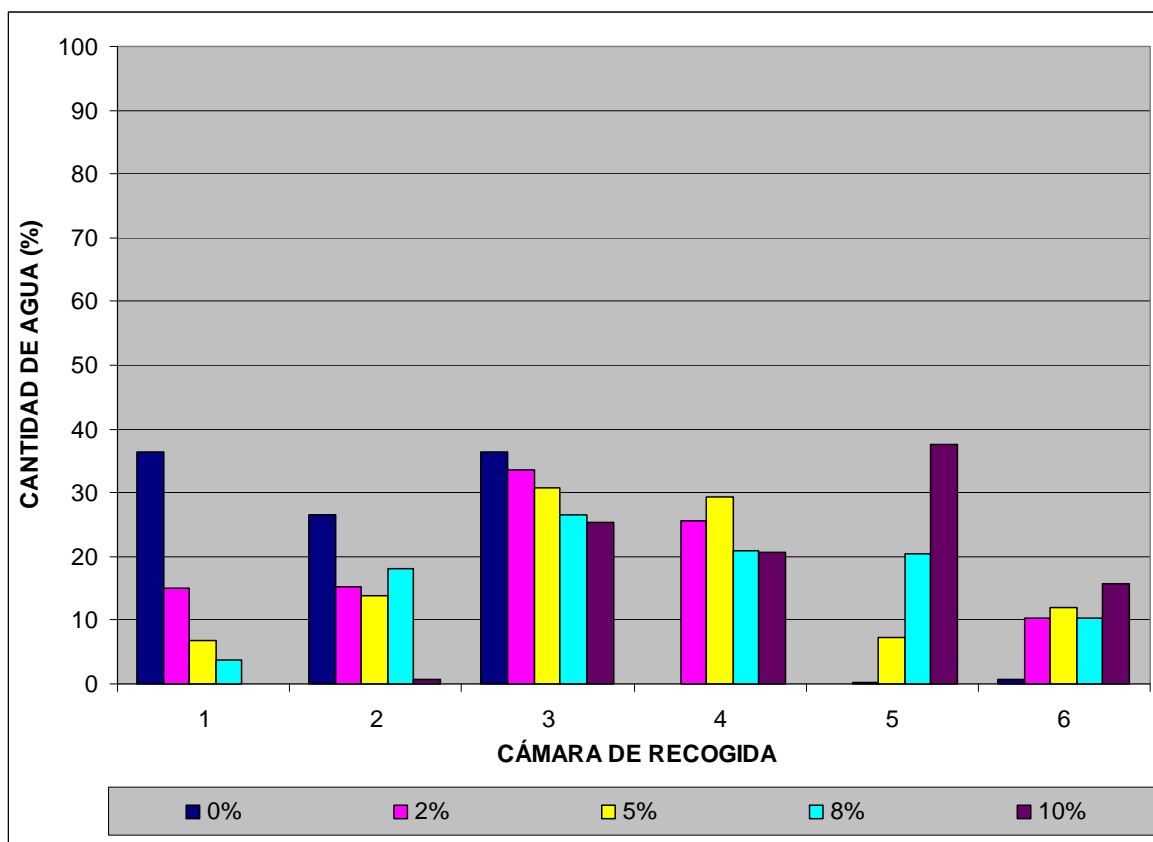


Figura IV-18. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras recién colocado.

Por último, para el análisis de los resultados de cada escenario se plantean los ajustes cuadráticos de los promedios obtenidos con cada inclinación para analizar las tendencias de los resultados. Así, en la Figura IV-19 se presentan las gráficas de los ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida por la escorrentía superficial sobre la superficie permeable de adoquines recién colocada, para cada una de las cinco inclinaciones ensayadas. En todos los ajustes se ha forzado el paso por el punto (0,0), correspondiente al comienzo de la superficie permeable. De estas gráficas se puede extraer que una franja de 50 cm de superficie permeable de adoquines, representada por la muestra ensayada, es capaz de infiltrar sobradamente el 100% del agua aportada al 0% de inclinación del pavimento. La misma superficie asegura una infiltración por encima del 90% para inclinaciones del 2%, 5% y 8%, siendo del 85% para la inclinación máxima del 10%. En todos los casos el porcentaje de agua infiltrada se refiere al total del agua recogida en las seis cámaras que forman parte del ICF (Infiltrómetro Cántabro Fijo).

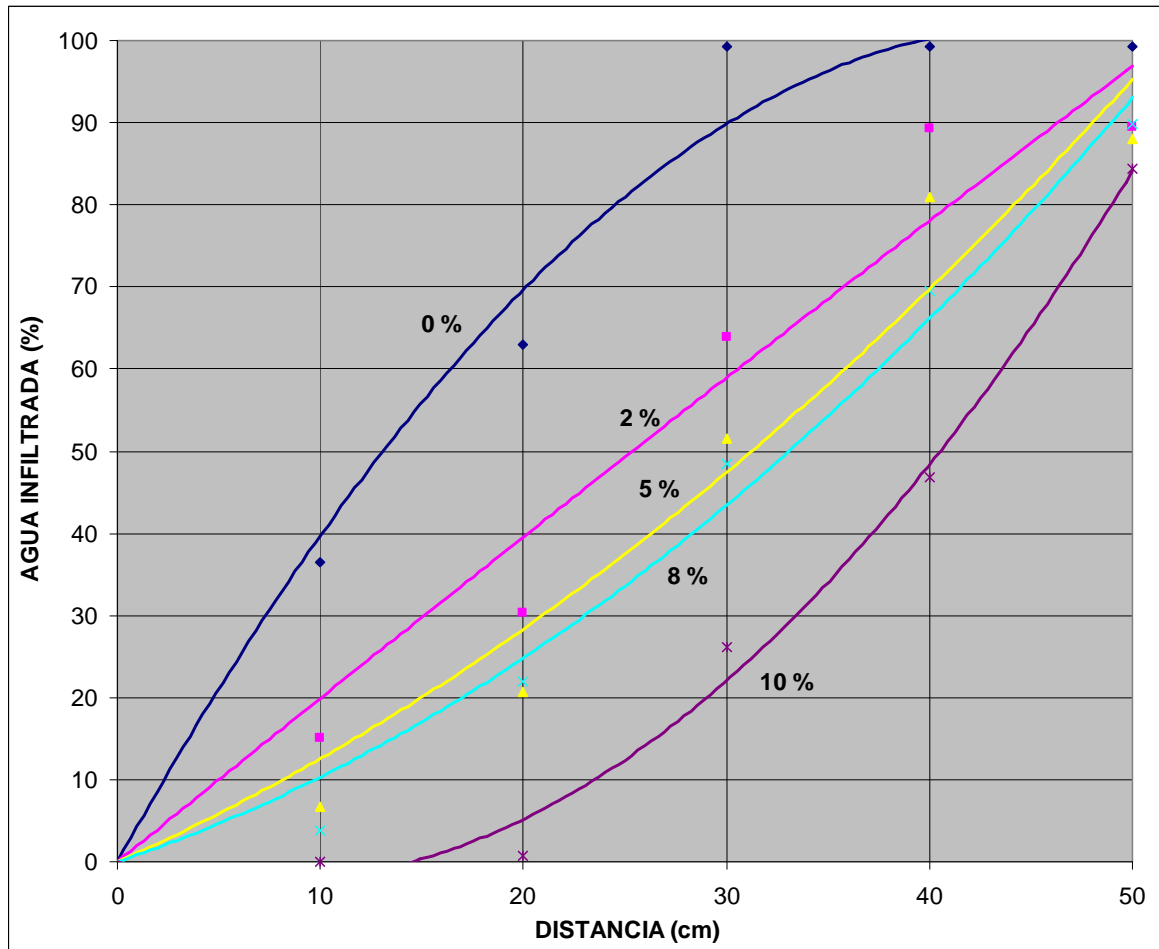


Figura IV-19. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras recién colocado.

La Tabla IV-4 recoge las ecuaciones y coeficientes de determinación de los cinco ajustes obtenidos. La igualdad de los ajustes permite observar como al empeorar la capacidad de infiltración con la inclinación los signos de los dos términos del ajuste van cambiando.

Tabla IV-4. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada ($\%_{\text{infiltrado}}$) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras recién colocado.

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada ($\%_{\text{infiltrado}}$) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R^2)
0%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0488 \cdot d^2 + 4,4605 \cdot d$	0,9552
2%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0013 \cdot d^2 + 2,005 \cdot d$	0,9320
5%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0163 \cdot d^2 + 1,0926 \cdot d$	0,9443
8%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0207 \cdot d^2 + 0,8265 \cdot d$	0,9795
10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0475 \cdot d^2 - 0,6898 \cdot d$	0,9911

IV.2.1.2 Superficie semi-colmatada

La Figura IV-20 recoge los promedios del porcentaje recogido en cada cámara inferior del ICF en el caso de superficie semi-colmatada con una carga de sedimento de 2 kg/m^2 . Así, se puede observar claramente como la cantidad de agua recogida en las cámaras 1 y 2, situadas al inicio del pavimento permeable, disminuye al aumentar la inclinación del modelo. Las cámaras 3 y 4 reflejan la transición hacia las cámaras 5 y 6. En estas últimas, al aumentar la pendiente, aumenta la cantidad de agua recogida, como corresponde a la parte final de un pavimento con una inclinación importante. Sin embargo, se observa la excepción de la pendiente del 2%, la cual presenta un valor ligeramente mayor de lo esperado en la cámara 6, probablemente motivado por una concentración del sedimento sobre la cámara 5.

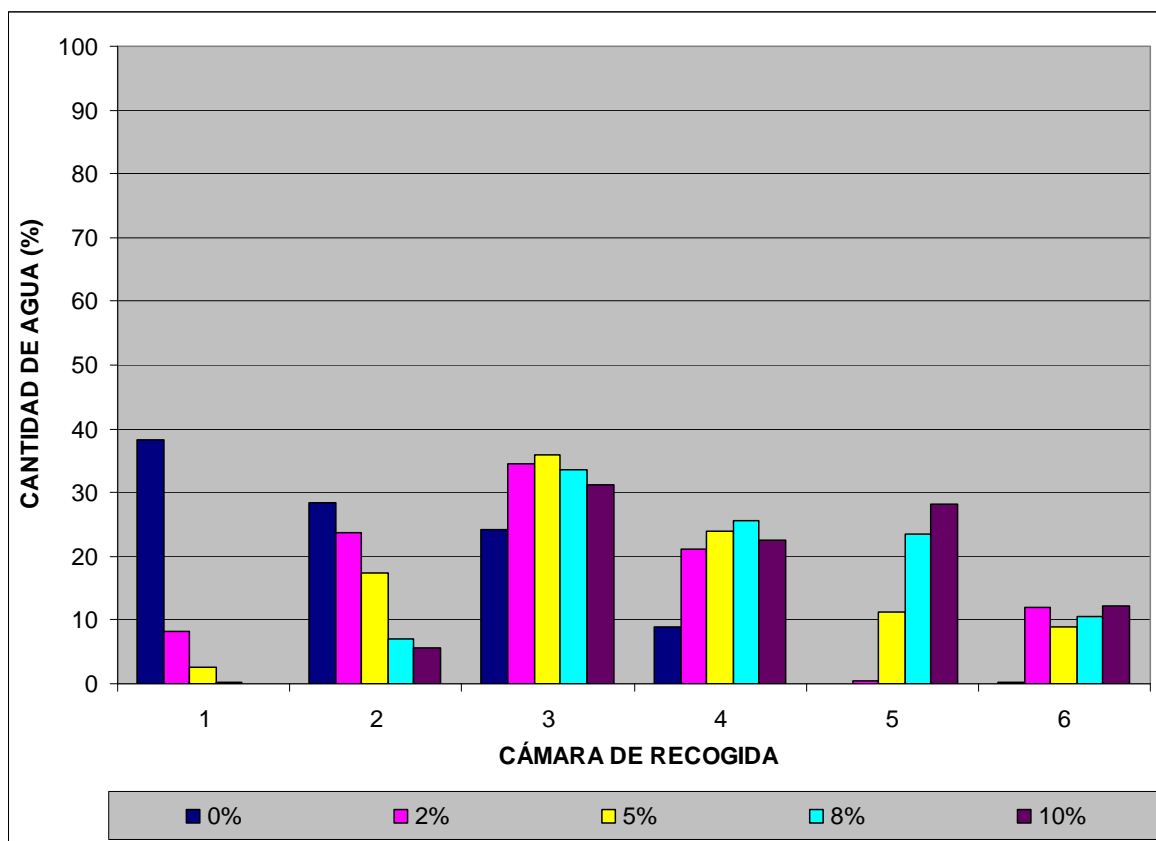


Figura IV-20. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras semi-colmatado.

El escenario 2 de superficie semi-colmatada supone una carga de sedimentos de 2 kg/m^2 . A pesar de este aporte de sedimento, los valores de escorrentía, recogidos en la cámara número 6, se mantienen semejantes a los resultantes de la superficie recién colocada. Así, la superficie semi-colmatada no presenta apenas escorrentía para la pendiente del 0% y ofrece valores en torno al 10% para el resto de inclinaciones. Por su parte, las longitudes de máximo

drenaje son de 10 cm para la inclinación del 0% y de 30 cm para el resto de pendientes, incluso para la pendiente máxima del 10%.

En la Figura IV-21 se presentan las gráficas de los ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida por la escorrentía superficial sobre la superficie permeable de adoquines semi-colmatada, para cada una de las inclinaciones ensayadas. Para todas las gráficas se ha forzado el paso por el punto (0,0), correspondiente al comienzo de la superficie permeable. Comparadas con las gráficas correspondientes a la superficie recién colocada, se observa como el ajuste del 10% de inclinación ofrece resultados de infiltración sensiblemente mejores en el caso de superficie semi-colmatada.

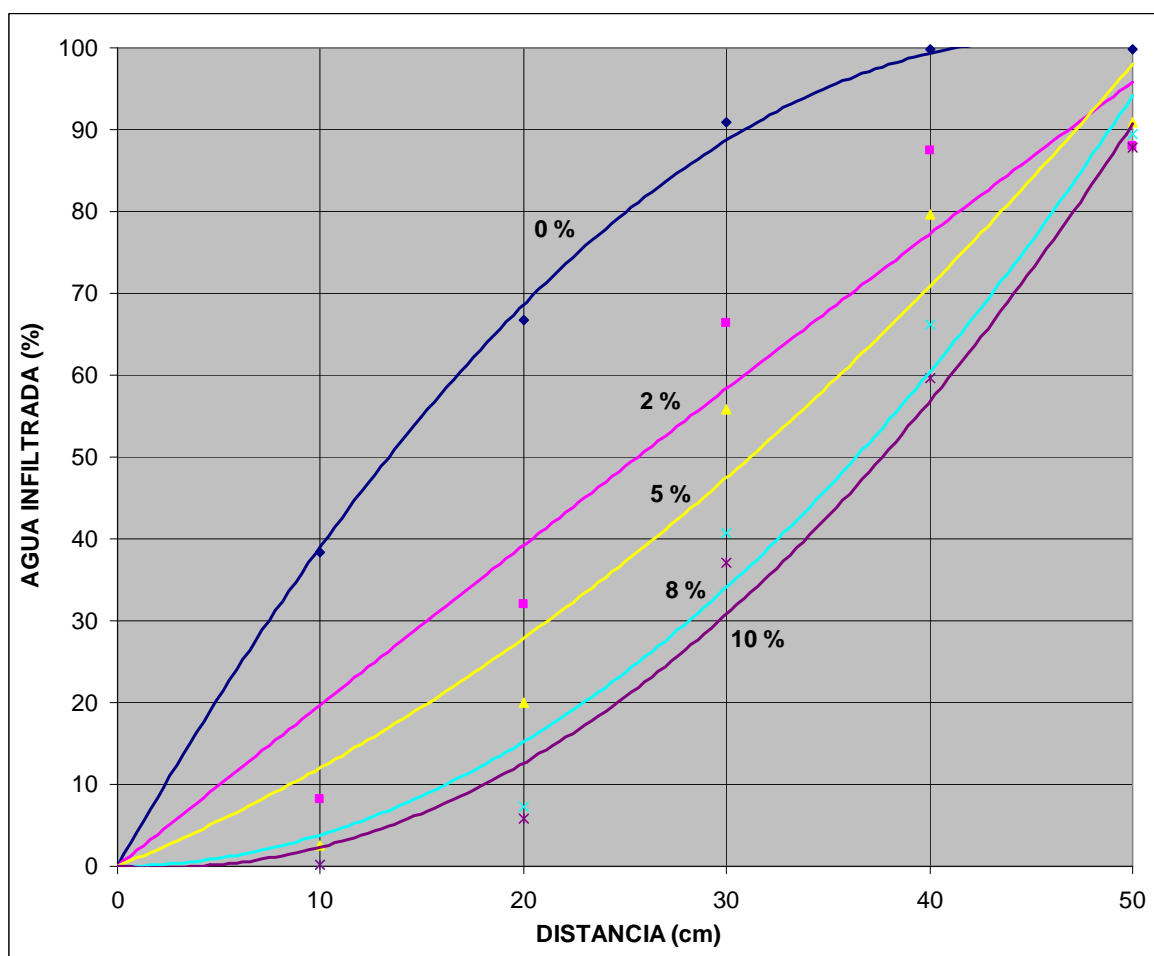


Figura IV-21. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras semi-colmatado.

La Tabla IV-5 recoge la ecuación y el coeficiente de determinación de los cinco ajustes cuadráticos planteados. Se puede observar de nuevo como los signos de los dos términos del ajuste cuadrático indican los cambios en la capacidad de infiltración de la superficie desde la mejor correspondiente a la inclinación del 0% (-, +), hasta la peor correspondiente a la

inclinación del 10% (+, -).

Tabla IV-5. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras semi-colmatado.

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R ²)
0%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0474 \cdot d^2 + 4,3793 \cdot d$	0,9965
2%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0014 \cdot d^2 + 1,9888 \cdot d$	0,9162
5%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0189 \cdot d^2 + 1,0166 \cdot d$	0,9388
8%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0374 \cdot d^2 + 0,0114 \cdot d$	0,9695
10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0395 \cdot d^2 - 0,1587 \cdot d$	0,9800

Del análisis de los resultados se puede extraer que el comportamiento de la superficie semi-colmatada es prácticamente el mismo, en algunos puntos incluso mejor, que el de la superficie recién colocada. Las mejorías observadas pueden deberse a que la presencia de sedimentos en la superficie, sin llegar a impedir la infiltración a través de las ranuras, dificulta el flujo de la escorrentía superficial, siendo esta influencia fundamentalmente significativa con inclinaciones elevadas.

IV.2.1.3 Superficie colmatada

La Figura IV-22 recoge los promedios del porcentaje de agua recogido en cada cámara inferior del ICF en los ensayos de superficie de adoquines con ranuras colmatada con una carga de sedimento de 4 kg/m². Se puede observar como la cantidad de agua recogida en las cámaras 1 y 2 es insignificante, con la excepción de la recogida a 0% de pendiente en la cámara 2. Las cámaras 3 y 4 muestran la transición hacia la cámara 5, que refleja la tendencia de aumento de la cantidad recogida con la inclinación de la superficie.

Por su parte, los valores de escorrentía recogidos en la cámara 6 son irregulares, con un mínimo del 11% para la inclinación del 5% y un máximo del 38% para la inclinación del 10%. Destacan los altos valores de escorrentía para las inclinaciones más bajas de 0% y 2%, motivados probablemente por una colmatación concentrada sobre la cámara 5 que pudo desviar el correspondiente volumen de agua hacia la cámara 6. Por su parte, las longitudes de máximo drenaje son de 30 cm para las inclinaciones del 0% y el 2%, y de 50 cm para el resto.

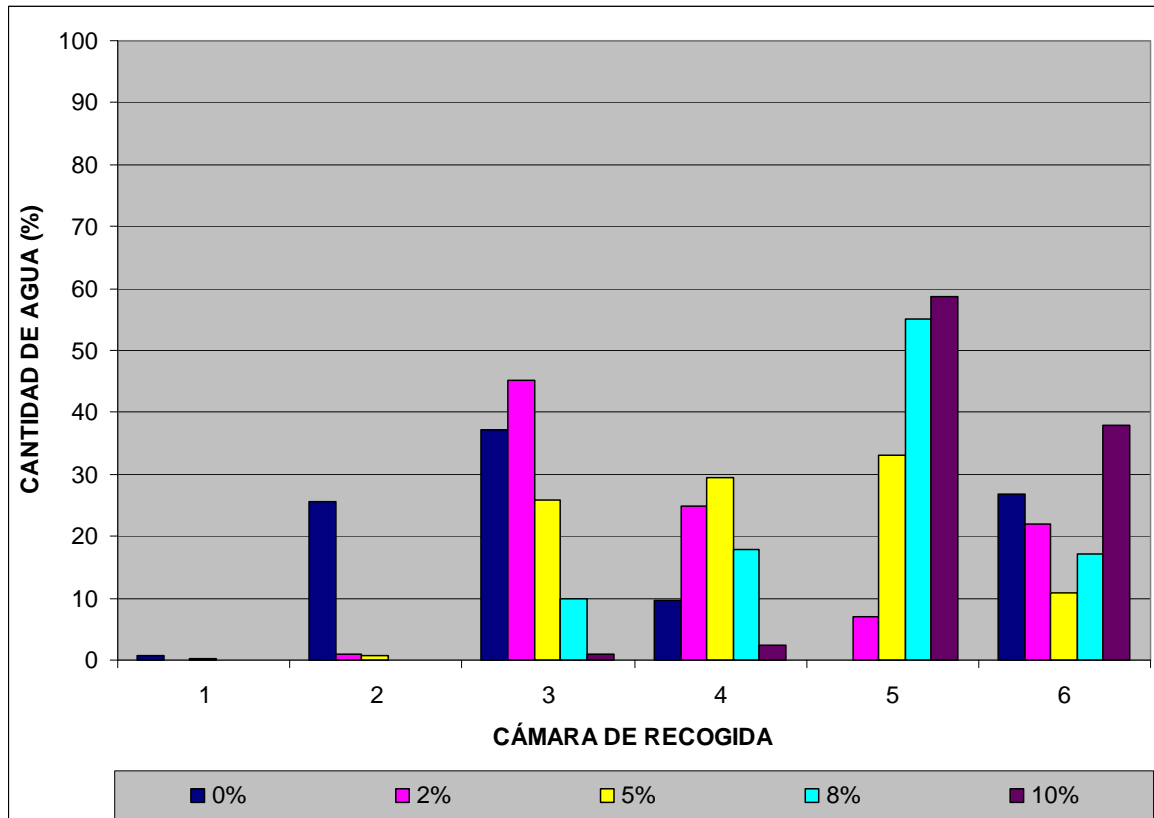


Figura IV-22. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas.

En la Figura IV-23 se presentan las gráficas de los ajustes cuadráticos del porcentaje de agua infiltrada en función de la longitud de pavimento permeable de adoquines colmatado, para cada una de las pendientes ensayadas. En esta ocasión no fue posible forzar el paso por el punto (0,0) de las gráficas correspondientes a las inclinaciones del 0% y el 2%, probablemente debido a una acumulación de sedimentos sobre las dos primeras cámaras que limitó la infiltración en esta parte de la muestra, incluso con pendientes bajas. En cualquier caso, todos los ajustes tienen su punto de partida de infiltración entre los 10 cm y los 30 cm sin que tenga sentido su paso por el origen de distancias. Por tanto, con la superficie colmatada la infiltración de la escorrentía superficial no empieza a producirse hasta recorridos al menos 10 cm sobre el pavimento permeable de adoquines. Por su parte, los porcentajes de agua infiltrada al cabo de los 50 cm de muestra de superficie permeable sufren un apreciable descenso respecto a los observados en los escenarios anteriores, siendo el máximo del 90% para el 5% de inclinación y el mínimo del 50% para el 10%.

La Tabla IV-6 recoge la ecuación y el coeficiente de determinación de los cinco ajustes cuadráticos planteados. El R^2 más bajo es de 0,795 y corresponde al ajuste lineal para la inclinación máxima del 10%.

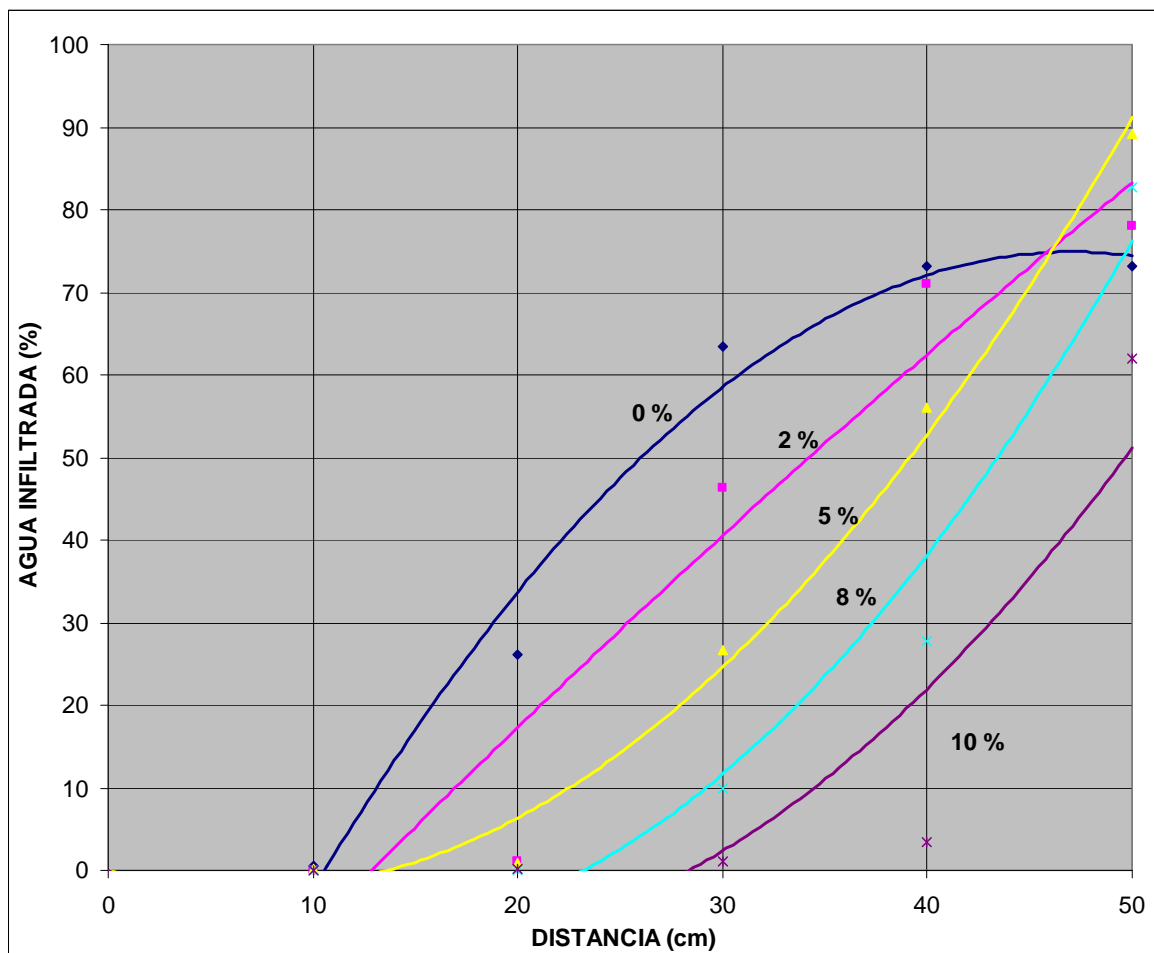


Figura IV-23. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas.

Respecto a los signos de los términos de los ajustes recogidos en la Tabla IV-6 se puede observar como las deficiencias en la capacidad de infiltración están asociadas a valores positivos y negativos (+ , -), correspondientes a los tres últimos ajustes.

Tabla IV-6. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas.

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R ²)
0%	$\%_{infiltrado} = -0,0569 \cdot d^2 + 5,2895 \cdot d - 49,6170$	0,9781
2%	$\%_{infiltrado} = -0,0060 \cdot d^2 + 2,6208 \cdot d - 32,6940$	0,9196
5%	$\%_{infiltrado} = 0,0502 \cdot d^2 - 0,6845 \cdot d$	0,9910
8%	$\%_{infiltrado} = 0,0569 \cdot d^2 - 1,3188 \cdot d$	0,9529
10%	$\%_{infiltrado} = 0,0472 \cdot d^2 - 1,3386 \cdot d$	0,7952

IV.2.1.4 *Superficie colmatada al máximo*

La Figura IV-24 recoge los promedios del porcentaje de agua recogido en cada cámara inferior del ICF respecto al total para el caso de superficie colmatada al máximo. Para colmatar al máximo la superficie permeable de adoquines de 10 cm de espesor fue necesaria una carga de sedimento de aproximadamente 5 kg/m^2 , siendo exactamente 1246,6 g repartidos en los $0,25 \text{ m}^2$ de la muestra. Así, se puede observar como las cantidades recogidas en las cinco cámaras situadas debajo de la superficie permeable están por debajo del 15%, a excepción del caso de la superficie plana, con valores ligeramente por encima en las cámaras 1 y 3. Los valores relativamente elevados recogidos en la cámara 1 para las inclinaciones del 0% y del 2% son probablemente debidos a que el mayor aporte de agua recibido en el inicio de la muestra tiene un mayor tiempo de estancia con inclinaciones bajas. Por su parte, los valores de escorrentía residual recogidos en la cámara 6 son elevados, aumentando además con la inclinación del pavimento. Estos resultados de escorrentía son los esperables de una superficie totalmente colmatada. Así, el mínimo de escorrentía se da para el 0% de inclinación con un valor del 41%, siendo el máximo del 91% para la pendiente del 10%.

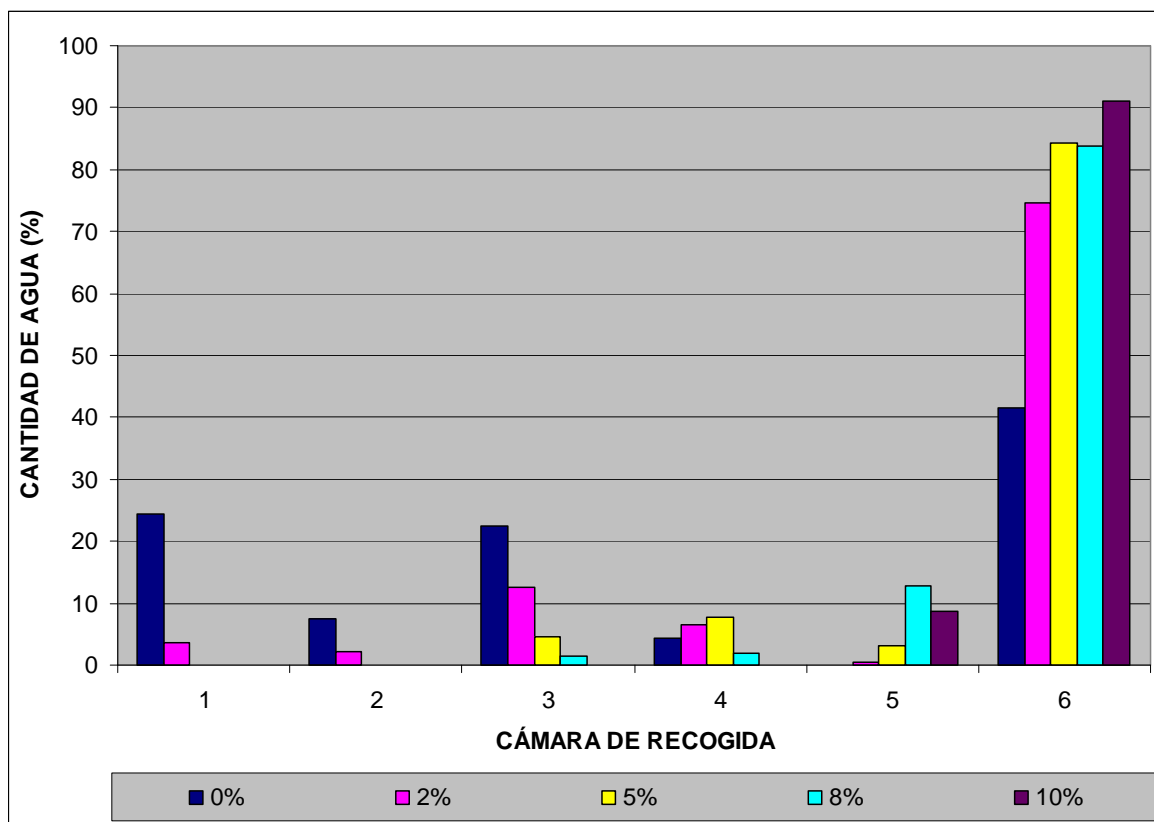


Figura IV-24. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo.

Las longitudes de drenaje son mayores de 50 cm en todos los casos, rebasando la longitud de la muestra ensayada. Por tanto, queda patente el empeoramiento crítico en la capacidad de infiltración de la superficie de adoquines con ranuras al pasar de una carga de sedimentos de 4 kg/m^2 a una de 5 kg/m^2 , la cual supone la colmatación máxima.

En la Figura IV-25 se presentan las gráficas de los ajustes cuadráticos del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia en centímetros desde la parte superior del pavimento permeable de adoquines colmatado al máximo, para cada una de las pendientes ensayadas. Se ha forzado el paso de todos los ajustes por el punto (0,0). Así, las gráficas de las inclinaciones de 0% y 2% parten del origen, mientras las gráficas correspondientes a las pendientes de 5%, 8% y 10% tan sólo tienen valores positivos de agua infiltrada a partir de distancias entre 10 cm y 30 cm.

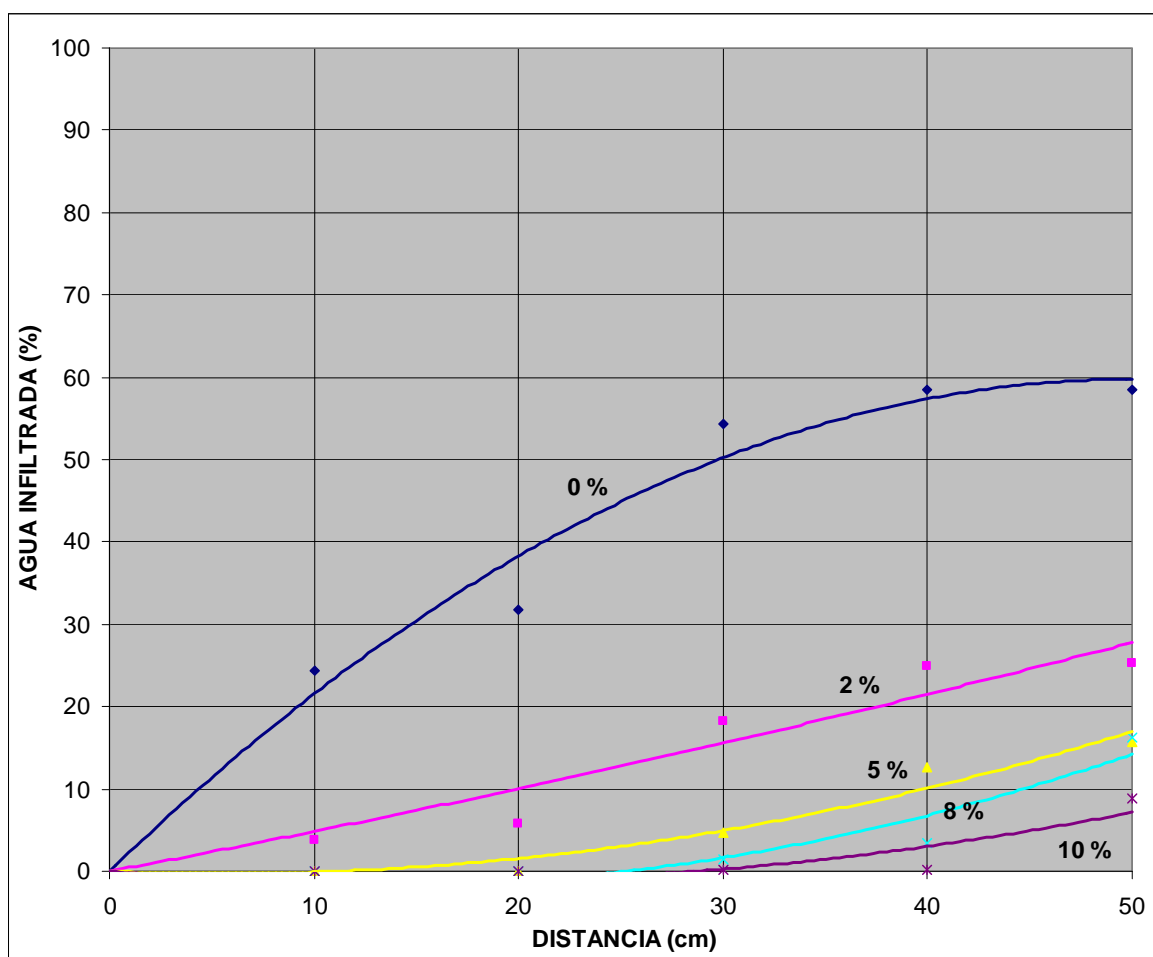


Figura IV-25. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo.

La superficie plana permite una infiltración del 60% al cabo de 50 cm de pavimento permeable de adoquines colmatado al máximo. Este porcentaje de infiltración supone una disminución de un 20% respecto al correspondiente con una carga de sedimento de 4 kg/m². Por su parte, la mínima infiltración está por debajo del 10% para la inclinación máxima. Además, las cuatro inclinaciones ensayadas, aparte de la superficie horizontal, aparecen agrupadas por debajo del 30% de infiltración al cabo de 50 cm, lo cual supone un descenso de más de un 30% de infiltración debido a la inclinación.

La Tabla IV-7 recoge la ecuación y el coeficiente de determinación de los cinco ajustes, siendo el R² más bajo 0,762 con la inclinación del 10%. Analizando los signos, tan sólo la ecuación del ajuste del 0% corresponde a una curva convexa con una buena tasa de infiltración desde el comienzo de la superficie. El ajuste del 2% supone un tránsito (+, +) hacia las tres gráficas que muestran la capacidad de infiltración más deficiente contando con signos positivo y negativo en los dos términos del ajuste (+, -).

Tabla IV-7. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo.

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R²)
0%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0240 \cdot d^2 + 2,3941 \cdot d$	0,9336
2%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0018 \cdot d^2 + 0,4662 \cdot d$	0,8970
5%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0087 \cdot d^2 - 0,0961 \cdot d$	0,9525
8%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0115 \cdot d^2 - 0,2896 \cdot d$	0,8917
10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0067 \cdot d^2 - 0,1930 \cdot d$	0,7618

IV.2.1.5 Superficie colmatada al máximo con mantenimiento

El mantenimiento sobre la superficie colmatada al máximo se simuló mediante un barrido que resultó en una recogida de 11,25 gramos, cantidad que supone una reducción de la carga de partículas colmatantes de 0,045 kg/m² respecto a los 5 kg/m² de partida. El sedimento arrancado mediante el barrido corresponde a la parte superior de las juntas, no siendo posible, mediante este sistema de barrido ligero y repartido, la movilización de las partículas compactadas en el interior de las ranuras entre adoquines. Para remover estas partículas compactadas y e incluso cementadas por los ciclos de humedad-sequedad de los ensayos anteriores, sería necesario un barrido concentrado con cerdas de mayor longitud y dureza, acompañado de un aspirado de las partículas movilizadas en el interior de las ranuras.

La Figura IV-26 recoge los promedios del porcentaje recogido en cada cámara inferior del ICF en los ensayos realizados tras el barrido de la superficie colmatada al máximo. Esta figura es prácticamente igual a la Figura IV-24, demostrando como el barrido superficial no afecta de manera significativa al comportamiento de la superficie totalmente colmatada. La principal mejora observada gracias al barrido es el aumento del porcentaje de infiltración, de un 24,3% a un 36,4%, en la cámara 1 con la inclinación del 0%, probablemente facilitado por la mayor aportación de agua en esa zona. Con todo, la longitud de máximo drenaje para todas las pendientes sigue siendo mayor de 50 cm.

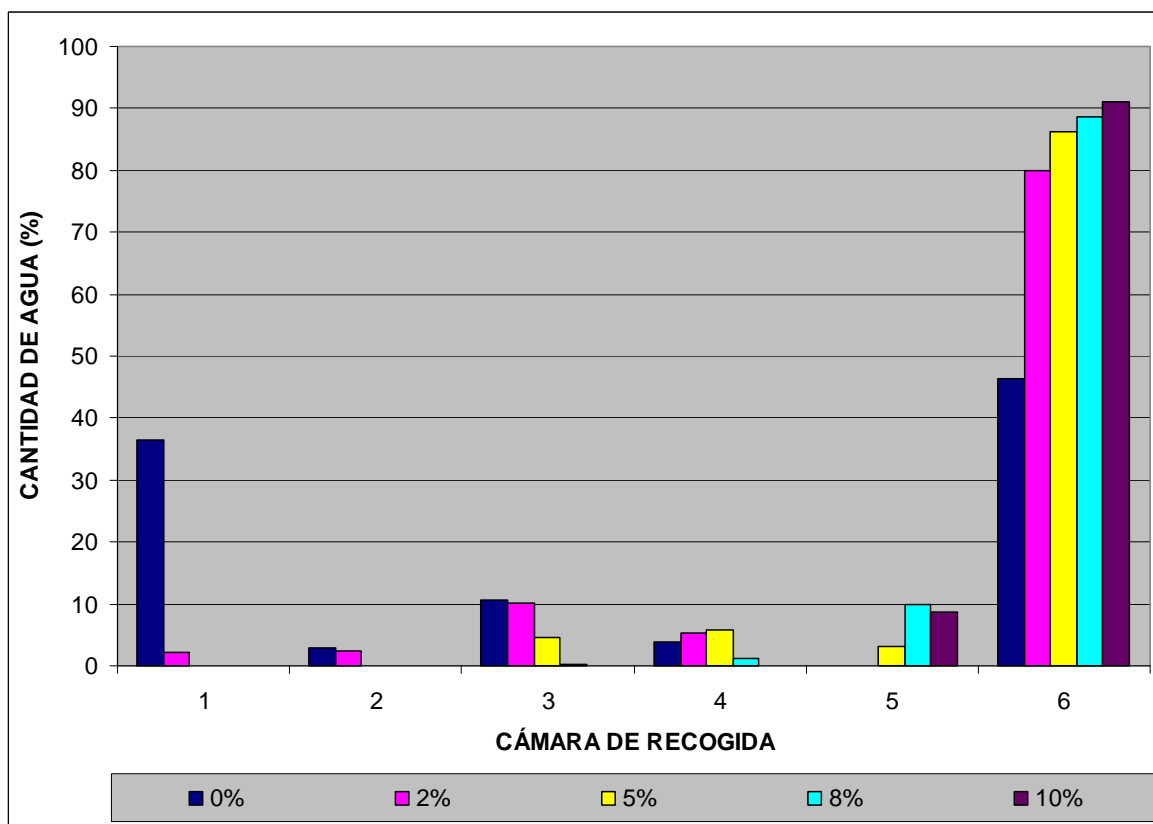


Figura IV-26. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo con mantenimiento.

En la Figura IV-27 se presentan las gráficas de los ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia en centímetros desde la parte superior de un pavimento permeable de adoquines colmatado al máximo y barrido, para cada una de las pendientes ensayadas. Todos los ajustes resultan en porcentajes de infiltración total notablemente inferiores a los correspondientes al escenario 4 de colmatación máxima, siendo la mínima infiltración final en torno al 8% para la pendiente del 10%.

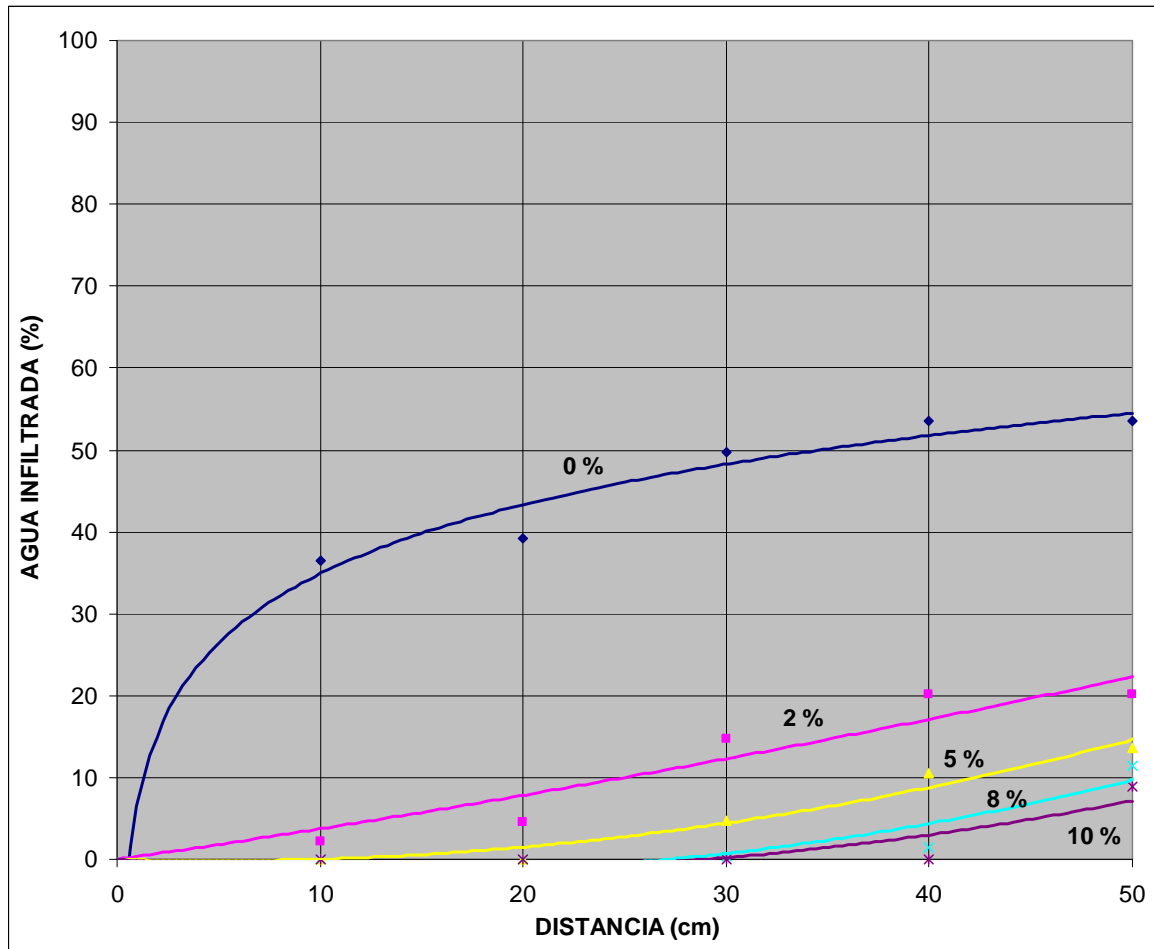


Figura IV-27. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo con mantenimiento.

Comparando la Figura IV-27 con la Figura IV-25, se observa la única mejora obtenida mediante el barrido en la gráfica del 0% de inclinación. Así, el barrido ha mejorado la infiltración en los primeros 20 cm de pavimento permeable con la superficie horizontal. Para el resto de inclinaciones las tendencias son semejantes en ambos casos, detectándose incluso leves empeoramientos asociados al barrido al aumentar la inclinación de la superficie. Estos resultados pueden deberse a que la limpieza superficial afectó fundamentalmente a aquellos sedimentos que podían ralentizar el flujo de la escorrentía sobre la superficie.

La Tabla IV-8 recoge las ecuaciones y los coeficientes de determinación de los cinco ajustes realizados para cada inclinación ensayada. El coeficiente de determinación R^2 más bajo es de 0,760 y corresponde al ajuste del 10% de inclinación. El efecto del barrido sobre la superficie horizontal queda patente al requerirse un ajuste logarítmico en vez de cuadrático.

Tabla IV-8. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada ($\%_{\text{infiltrado}}$) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatadas al máximo con mantenimiento.

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada ($\%_{\text{infiltrado}}$) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R^2)
0%	$\%_{\text{infiltrado}} = 12,1880 \cdot \ln(d) + 6,8045$	0,9041
2%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0018 \cdot d^2 + 0,3559 \cdot d$	0,8886
5%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0072 \cdot d^2 - 0,0697 \cdot d$	0,9598
8%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0085 \cdot d^2 - 0,2294 \cdot d$	0,8445
10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0068 \cdot d^2 - 0,1959 \cdot d$	0,7601

Respecto a los signos de los términos de los ajustes, se observa de nuevo como para las mayores inclinaciones, 5%, 8% y 10%, asociadas con capacidades de infiltración deficientes, se repiten los signos positivo y negativo.

IV.2.2 MEZCLA BITUMINOSA POROSA

La mezcla bituminosa porosa ensayada como pavimento permeable continuo fue del tipo PA-12. El promedio del porcentaje de huecos en mezcla de las probetas de 500 mm x 500 mm x 100 mm empleadas en los ensayos de resistencia a la colmatación con el ICF fue de 29,4%, calculados geoméricamente, o el 25,2%, calculados a partir de los resultados del ensayo con el permeámetro LCS.

IV.2.2.1 Superficie recién colocada

Las seis probetas de mezcla bituminosa porosa fueron caracterizadas en este escenario sin colmatación, agrupándose de la siguiente forma:

- Probetas 1, 2 y 3: colocadas con la cara más cerrada hacia arriba, representan una disposición con capacidad de infiltración creciente.
- Probetas 4, 5 y 6: colocadas con la cara más cerrada hacia abajo, representan una disposición con capacidad de infiltración decreciente.

La Figura IV-28 recoge los promedios del porcentaje de agua recogido en cada cámara inferior del ICF para los ensayos correspondientes a las probetas 1, 2 y 3, recién colocadas. Así, se puede observar claramente como la cantidad de agua recogida en las cámaras 1 y 2, situadas al inicio del pavimento permeable, disminuye al aumentar la inclinación del modelo. Esta tendencia se mantiene en la cámara 3, siendo la cámara 4 la que refleja la transición hacia las cámaras 5 y 6, que experimentan un claro aumento de la medida con la inclinación.

Como era de esperar, en el caso de una superficie sin carga alguna de sedimentos, los valores de escorrentía, correspondientes a la medición de la cámara número 6, se mantienen para todas las pendientes por debajo del 10%, aumentando desde un 2% a un 9% a medida que se incrementa la pendiente de la superficie.

Por su parte, las longitudes de máximo drenaje en este caso son de 10 cm para la pendiente del 0%, 30 cm con el 2% y 5% de inclinación, y 50 cm con el 8% y 10%. Estas longitudes pueden comprobarse en la Figura IV-28, asignando a las mismas el valor de la distancia medida desde el comienzo de la superficie permeable, parte alta que recibe el aporte de escorrentía superficial simulada, hasta el final del sector del pavimento situado encima de la cámara que recoge el máximo porcentaje de agua.

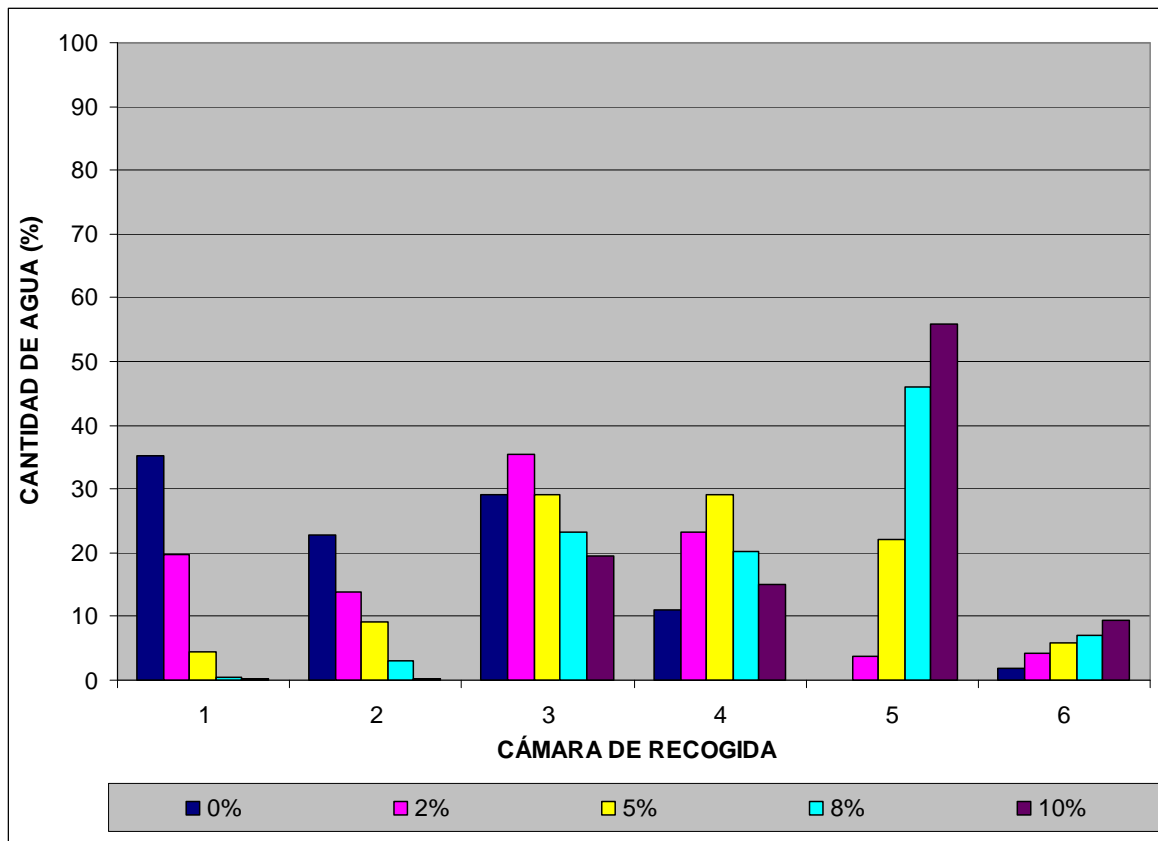


Figura IV-28. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 1, 2 y 3).

En la Figura IV-29 se presentan las gráficas de los ajustes cuadráticos del porcentaje de agua infiltrada en función de la longitud recorrida sobre la mezcla bituminosa porosa, para cada una de las inclinaciones ensayadas con las probetas 1, 2 y 3 recién colocadas. Los ajustes de las inclinaciones del 0%, 2% y 5% pasan estrictamente por el punto (0,0) y suponen el inicio de la infiltración desde el comienzo de la superficie permeable. Mientras, los ajustes de las pendientes del 8% y 10%, aún pasando por el (0,0), ofrecen valores positivos a partir de las distancias de 15 cm y 20 cm, respectivamente. De esta figura se puede extraer que una franja de 50 cm de pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa, con permeabilidad creciente con la profundidad (probetas 1, 2 y 3), colocada con el 0% de inclinación, es capaz de infiltrar sobradamente el 100% del agua aportada en el ensayo. Mientras, esta misma superficie, colocada con un 10% de inclinación, registra una infiltración mínima del 85%.

Dados los resultados regulares obtenidos con las probetas 1, 2 y 3, la Figura IV-28 y la Figura IV-29 servirán de modelo de comparación para el resto de los escenarios de colmatación estudiados con mezcla bituminosa porosa. Resaltar que estas probetas, colocadas con la cara más cerrada hacia arriba, se asemejan a una superficie porosa bicapa con permeabilidad creciente.

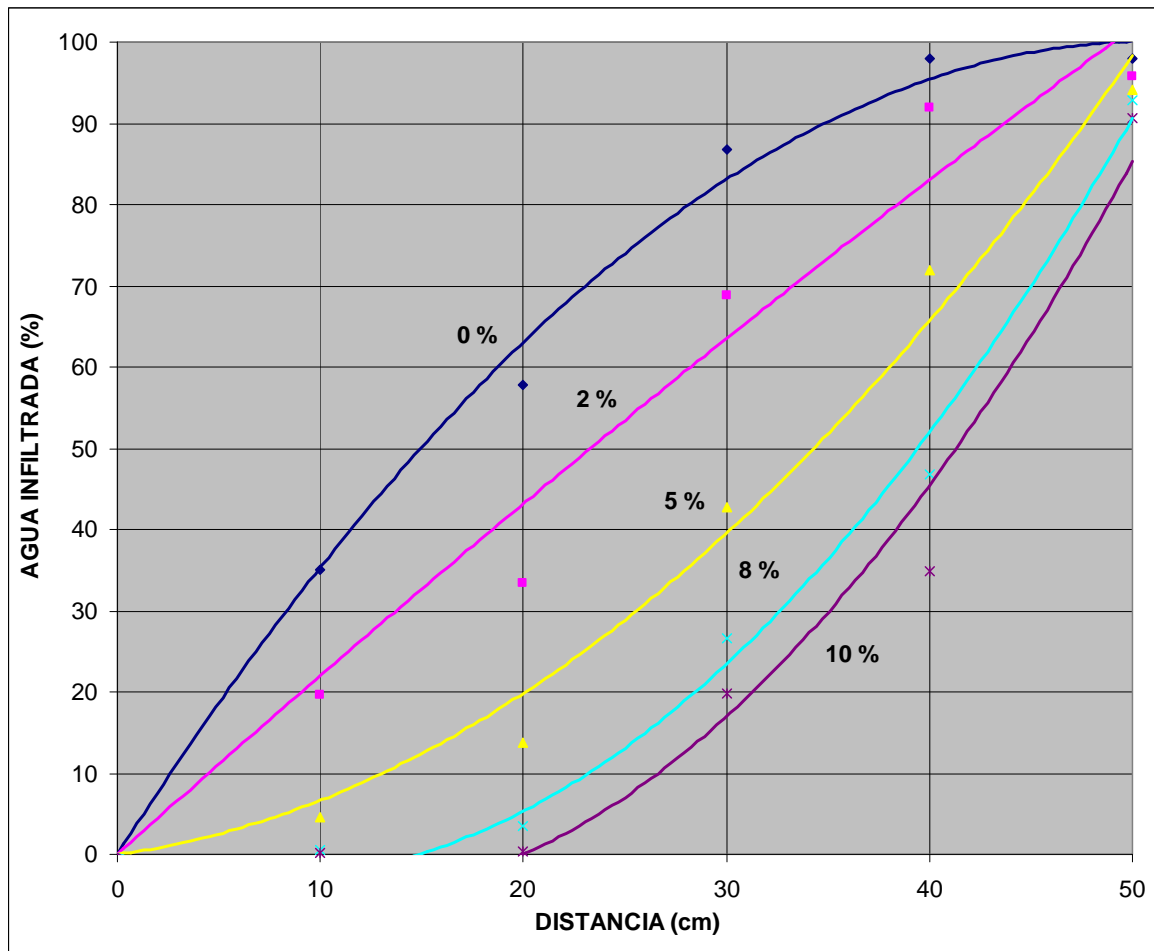


Figura IV-29. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 1, 2 y 3).

La Tabla IV-9 recoge la ecuación y el coeficiente de determinación de los ajustes cuadráticos. La evolución de los signos va desde los dos ajustes iniciales (–, +) hasta los dos ajustes finales (+, –), pasando por la transición que supone el ajuste del 5% (+, +).

Tabla IV-9. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 1, 2 y 3).

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R ²)
0%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0384 \cdot d^2 + 3,9205 \cdot d$	0,9830
2%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0042 \cdot d^2 + 2,2425 \cdot d$	0,9478
5%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0325 \cdot d^2 + 0,3423 \cdot d$	0,9809
8%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0515 \cdot d^2 - 0,7640 \cdot d$	0,9906
10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0569 \cdot d^2 - 1,1404 \cdot d$	0,9670

Por otra parte, la Figura IV-30 muestra el agua recogida en cada cámara para el segundo grupo de probetas (4, 5 y 6), recién colocadas. De nuevo, se puede observar claramente como la cantidad de agua recogida en las cámaras 1 y 2, disminuye al aumentar la inclinación de la muestra, hasta ser prácticamente del 0% para inclinaciones del 8% y 10%. Las cámaras 3 y 4 vuelven a ser transición entre cámaras que se vacían y cámaras que se llenan al aumentar la inclinación, siendo la cámara 4 la que muestra más claramente este cambio.

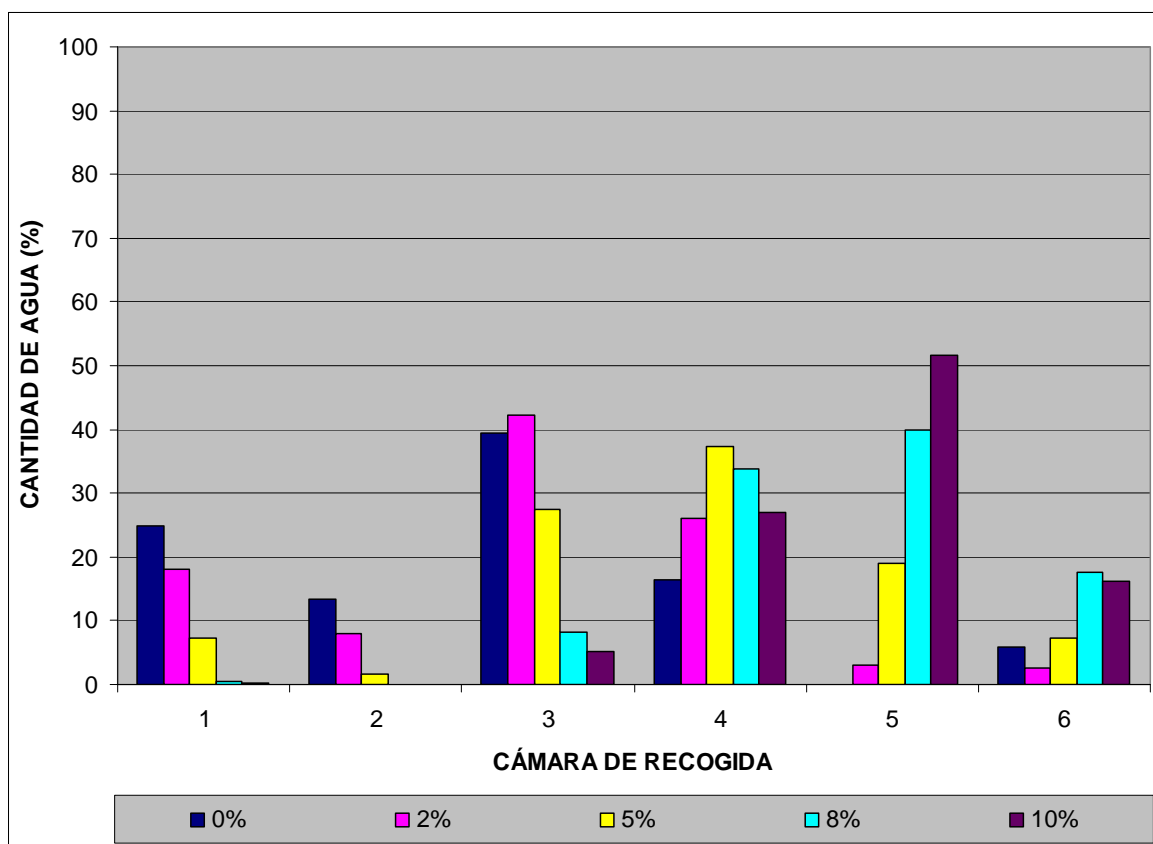


Figura IV-30. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 4, 5 y 6).

En la cámara 5, es claro el aumento de la cantidad de agua recogida al incrementar la inclinación. Sin embargo, no ocurre lo mismo en la cámara 6, donde se observan cantidades superiores a las esperadas para inclinaciones de 0% y 8%. Analizando el caso de la superficie horizontal, en comparación con la Figura IV-28, se puede constatar una menor capacidad de infiltración registrada en las cámaras 1 y 2 que, a pesar de los mayores valores en las cámaras 3 y 4, implica un mayor porcentaje de escorrentía. Con todo, la máxima escorrentía registrada es del 17,7%, para la pendiente del 8%. Por su parte, las longitudes de máximo drenaje son de

30 cm con inclinaciones del 0% y 2%, 40 cm con el 5% y 50 cm con el 8 y 10%.

Con todo, las probetas 4, 5 y 6, representantes de un pavimento bicapa con permeabilidad decreciente con la profundidad, presentan mayores valores de escorrentía superficial con pendientes del 8% y 10%, y mayores longitudes de máximo drenaje para las inclinaciones del 0%, 2%, 5% y 8%, que las probetas 1, 2 y 3, representantes de un pavimento bicapa con permeabilidad creciente con la profundidad.

En la Figura IV-31 se presentan las gráficas de los ajustes cuadráticos del porcentaje de agua infiltrada en función de la longitud recorrida sobre la superficie permeable, para cada una de las pendientes ensayadas con las probetas 4, 5 y 6 recién colocadas. Los ajustes del 0%, 2% y 5% de inclinación parten del punto (0,0), correspondiente al comienzo de la superficie permeable, mientras que los del 8% y 10%, aún pasando por el (0,0), ofrecen valores positivos a partir de las distancias de 21 cm y 24 cm, respectivamente.

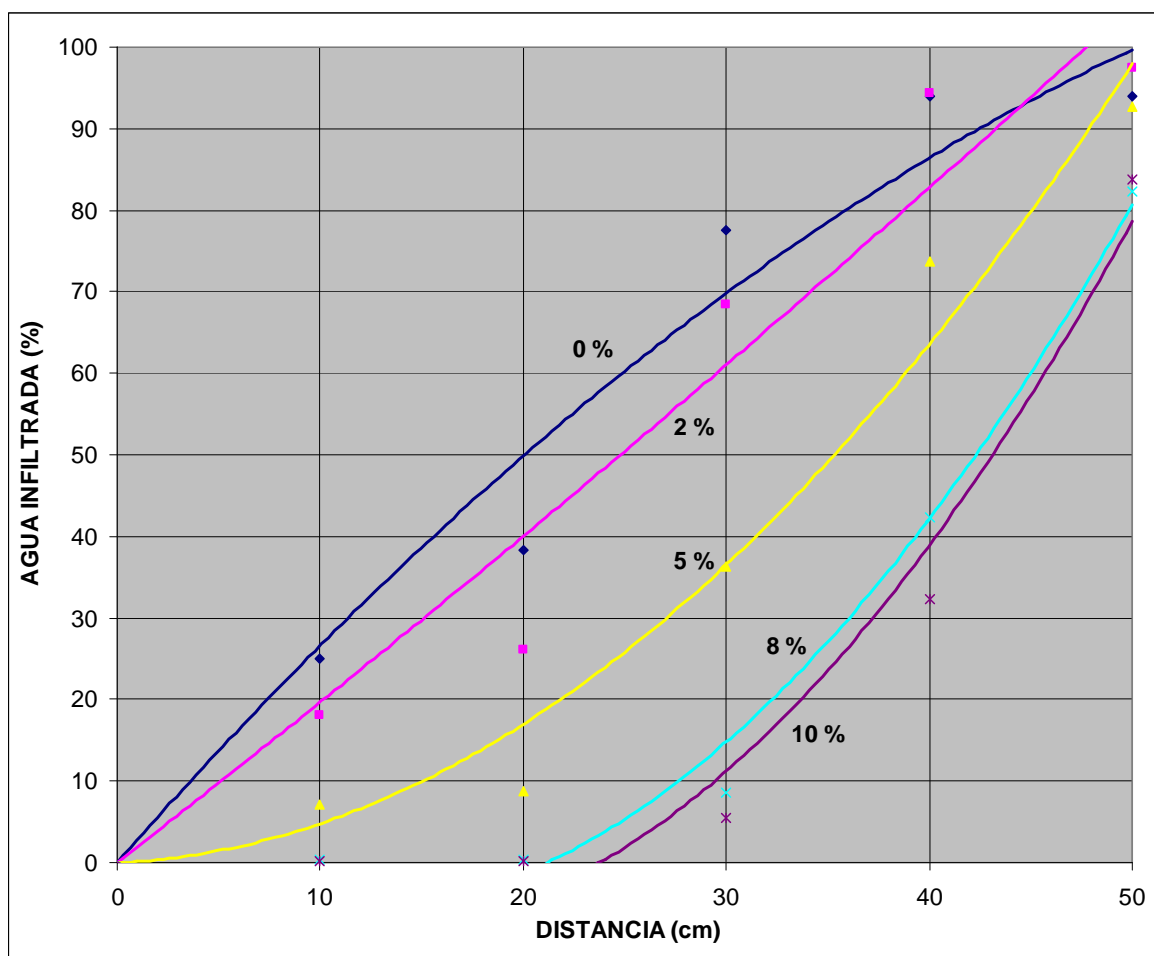


Figura IV-31. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 4, 5 y 6).

La Tabla IV-10 recoge la ecuación y el coeficiente de determinación de cada uno de los ajustes planteados. Según estos ajustes, las probetas 4, 5 y 6, son capaces de infiltrar el 100% del agua con la superficie horizontal, y el 80% con la superficie inclinada al 10%. Este último valor supone un descenso de un 5% respecto al correspondiente a las probetas 1, 2 y 3.

Tabla IV-10. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado (probetas 4, 5 y 6).

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R²)
0%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0167 \cdot d^2 + 2,8273 \cdot d$	0,9310
2%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0034 \cdot d^2 + 1,9331 \cdot d$	0,9198
5%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0371 \cdot d^2 + 0,1063 \cdot d$	0,9657
8%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0561 \cdot d^2 - 1,1887 \cdot d$	0,9824
10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0599 \cdot d^2 - 1,4237 \cdot d$	0,9617

IV.2.2.2 Superficie colmatada al máximo

Las tres probetas seleccionadas para el estudio de este escenario pésimo de colmatación fueron las 4, 5 y 6. La carga de sedimento ensayada fue la misma en los tres casos: 2 kg/m². Dado que parte del sedimento quedaba suelto sobre la superficie, durante los ensayos con el ICF se pudo observar claramente como las cinco líneas de simulación de lluvia sobre el pavimento producían una importante limpieza superficial gracias al impacto de las gotas.

La Figura IV-32 recoge los promedios del porcentaje recogido en cada cámara inferior del ICF para las probetas 4, 5 y 6 colmatadas al máximo. Así, se puede observar claramente como la cantidad de agua recogida en las cámaras 1 y 2, situadas al inicio del pavimento permeable, es sensiblemente inferior al resto, disminuyendo con la inclinación. Esta tendencia se mantiene en la cámara 3, salvo para la inclinación del 0%. Por su parte, la cámara 4 es claramente de transición, mientras que las cámaras 5 y 6 presentan algunos valores que deben ser justificados. Así, para la inclinación del 2%, el valor registrado en la cámara 5 es más bajo de lo esperado, mientras que en la cámara 6 es más alto de lo esperado. A la inversa ocurre con los valores correspondientes a las inclinaciones del 8% y 10%, más altos de lo esperado en la cámara 5 y más bajos en la cámara 6. Con inclinaciones importantes, los sedimentos acumulados en la superficie de los dos primeros quintos de la muestra son arrastrados por la escorrentía y desplazados a la parte final de la muestra. Se produce así un efecto barrera que frena la generación de escorrentía residual y facilita la infiltración en la cámara 5. Mientras, para la inclinación del 2% este arrastre no llega a ocurrir y simplemente se convierte en

escorrentía el agua que con el 0% se infiltraba en la cámara 5.

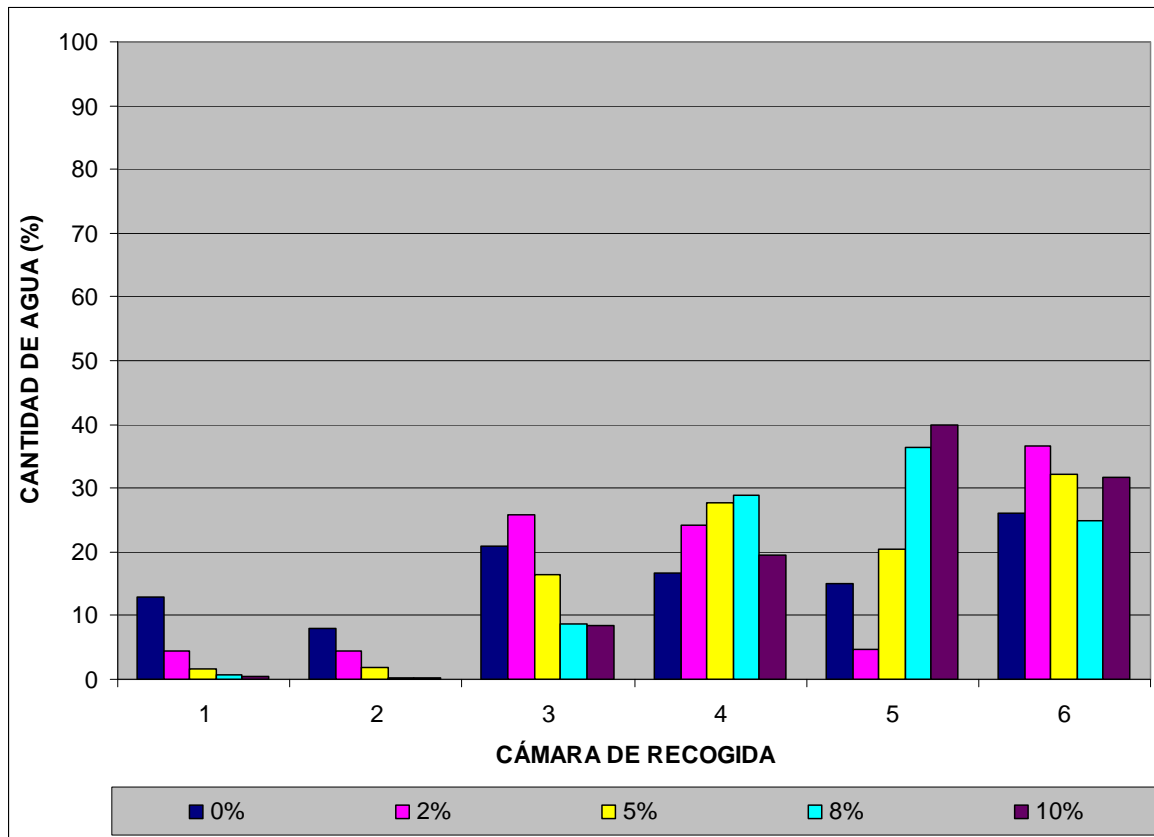


Figura IV-32. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo.

Los valores de escorrentía residual están entre el 24% y el 36%, siendo mayores que en el caso de las mismas probetas recién colocadas, con un aumento de un 20% de media. Las longitudes de máximo drenaje para superficie de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo son de 30 cm para la inclinación del 0%, mayor de 50 cm para el 2% y 5%, y 50 cm para el 8 y 10%, si bien estas longitudes asociadas a las dos inclinaciones más altas serían también mayores de 50 cm en caso de no producirse la acumulación superficial de sedimentos en la parte final de la probeta.

En la Figura IV-33 se presentan las gráficas de los ajustes cuadráticos del porcentaje de agua infiltrada en función de la longitud recorrida sobre la superficie permeable de mezcla bituminosa porosa, para cada una de las pendientes ensayadas con las probetas 4, 5 y 6 colmatadas al máximo. Los ajustes del 0% y 2% de inclinación comienzan a registrar infiltración desde el inicio de la superficie permeable, mientras que el resto lo hacen a partir de 10 cm, 20 cm y 22 cm, respectivamente. Los porcentajes infiltrados al cabo de los 50 cm de muestra no son especialmente bajos, variando entre el 65% y el 75% según la inclinación.

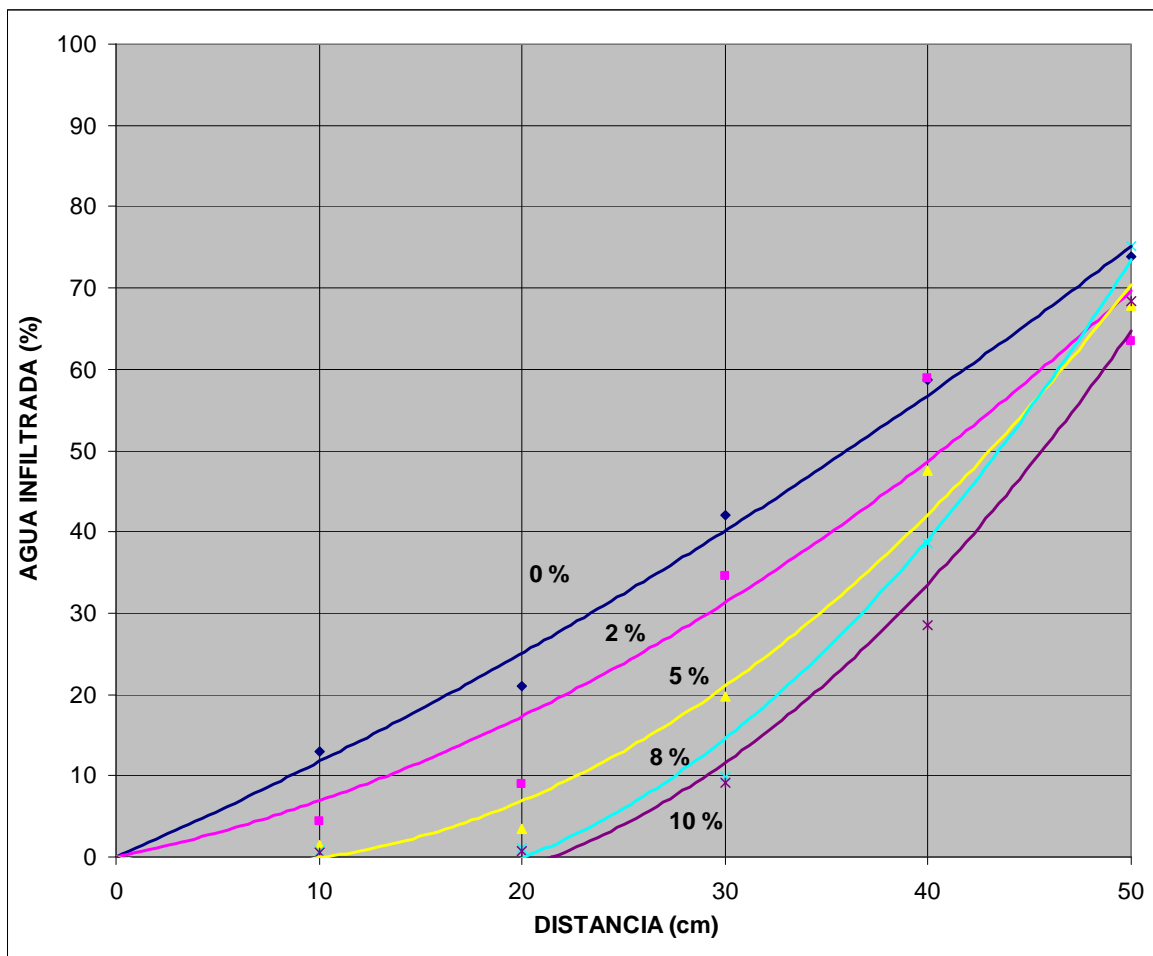


Figura IV-33. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo.

La Tabla IV-11 recoge la ecuación y el coeficiente de determinación de cada uno de los ajustes. Observando los signos se comprueba que no hay ningún ajuste que muestre una buena capacidad de infiltración (−, +), siendo todos ellos cóncavos y los tres últimos con fuerte influencia negativa del término lineal.

Tabla IV-11. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo.

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada (% _{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R ²)
0%	$\%_{infiltrado} = 0,0083 \cdot d^2 + 1,0887 \cdot d$	0,9896
2%	$\%_{infiltrado} = 0,0176 \cdot d^2 + 0,5140 \cdot d$	0,9229
5%	$\%_{infiltrado} = 0,0354 \cdot d^2 - 0,3633 \cdot d$	0,9844
8%	$\%_{infiltrado} = 0,0492 \cdot d^2 - 0,9908 \cdot d$	0,9852

10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0454 \cdot d^2 - 0,9763 \cdot d$	0,9746
-----	--	--------

IV.2.2.3 Superficie colmatada al máximo con mantenimiento

Las tres probetas seleccionadas para el estudio de este escenario de colmatación máxima con mantenimiento fueron las probetas 1, 2 y 3. Tras la aplicación de 2 kg/m^2 de sedimentos y su barrido, las cargas de colmatación resultantes fueron de $0,56 \text{ kg/m}^2$ para la probeta 1; $0,92 \text{ kg/m}^2$ para la probeta 2 y $0,76 \text{ kg/m}^2$ para la probeta 3, siendo el promedio de las tres de $0,75 \text{ kg/m}^2$. Esta diferencia en las cantidades de sedimento empleadas se debe a la fuerte dependencia del índice de huecos de la probeta. En la Figura IV-34 se muestra la correlación existente entre huecos de las probetas, calculados geoméricamente o estimados con el LCS, y la cantidad de sedimento remanente en la superficie tras la simulación de mantenimiento. Así, se comprueba que la cantidad de sedimento que permanece en una superficie de mezcla bituminosa tras la limpieza de la misma es mayor cuanto mayor sea el porcentaje de huecos de la misma.

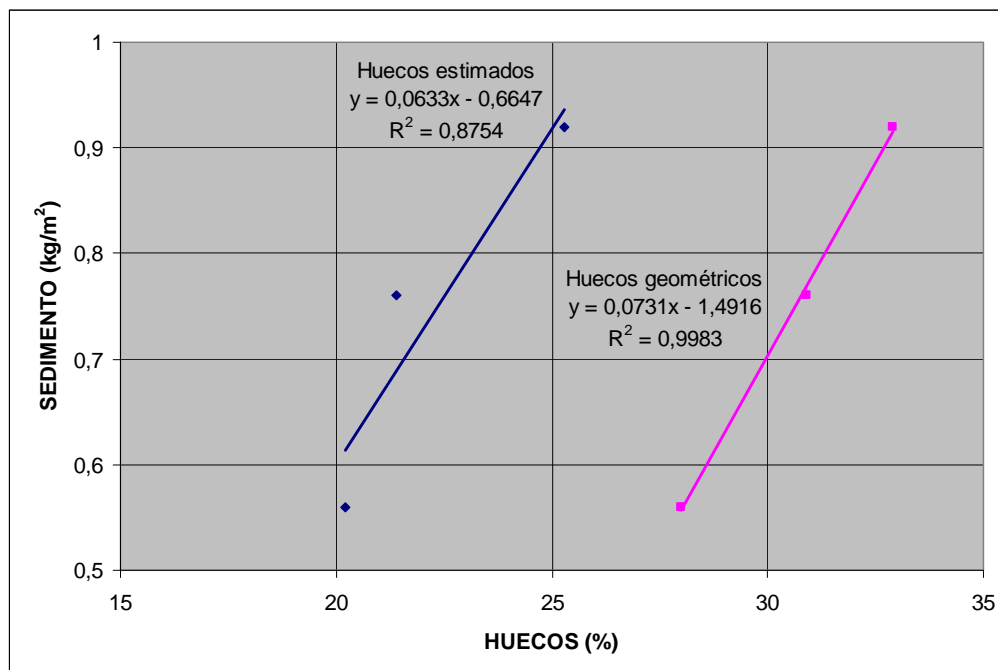


Figura IV-34. Ajustes del sedimento retenido tras el barrido de las probetas de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo en función de los huecos de la misma.

La Figura IV-35 recoge los promedios del porcentaje recogido en cada cámara inferior del ICF para el caso de superficie colmatada al máximo con mantenimiento. En comparación con la superficie recién colocada (Figura IV-28), se detecta un leve empeoramiento de la capacidad de infiltración con un traslado de los mayores porcentajes de infiltración hacia el final de la muestra. Así, la cámara 3 deja de ser de transición para comportarse igual que las

situadas al inicio del pavimento permeable. Incluso la cámara 4 podría incluirse en este grupo de tendencia, si no fuese porque el valor para la inclinación del 0% está por debajo del 10%. Mientras, en las cámaras 5 y 6 se registra prácticamente el mismo comportamiento de aumento de la cantidad recogida con el incremento de la pendiente. En cualquier caso, este comportamiento es claramente más próximo al del pavimento de mezcla bituminosa porosa recién colocado que al de la superficie colmatada al máximo (Figura IV-32).

Las longitudes de máximo drenaje tras el mantenimiento simulado son de 10 cm con la inclinación del 0%, 30 cm con el 2% y 5% y 50 cm para el 8% y 10%. Estos valores coinciden con los asociados a las mismas probetas recién colocadas. Así, la única diferencia entre ambos casos es la posición de la transición, más alejada del inicio en el caso de la superficie colmatada con mantenimiento. Estas escasas diferencias entre la superficie recién colocada y la superficie colmatada con mantenimiento están justificadas por las bajas cargas de sedimentos remanentes tras el barrido superficial, tan sólo $0,75 \text{ kg/m}^2$ de media, lo cual supone un 37,5% de la carga inicial de 2 kg/m^2 .

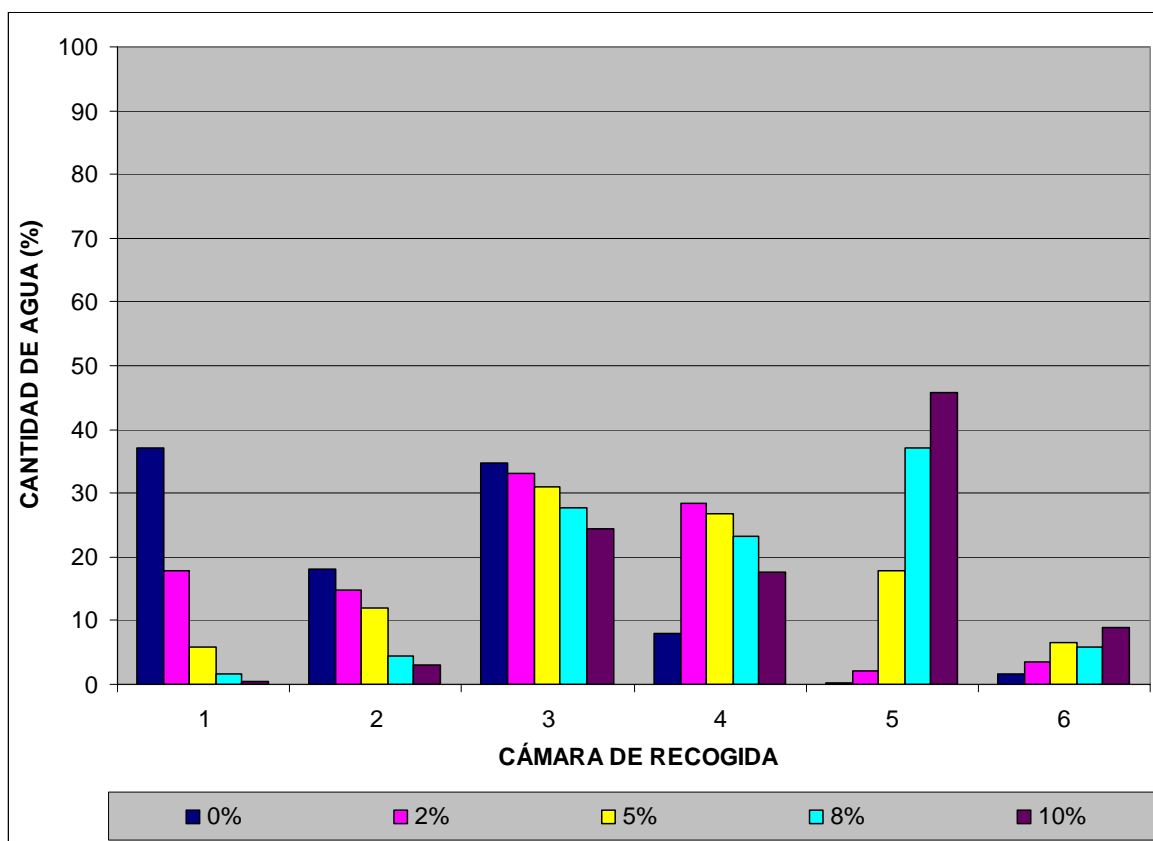


Figura IV-35. Promedios del porcentaje de agua recogida en cada cámara del ICF para cada inclinación del pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo con mantenimiento.

En la Figura IV-36 se presentan las gráficas de los ajustes cuadráticos del porcentaje de agua infiltrada en función de la longitud recorrida sobre la superficie permeable, para cada una de las pendientes ensayadas con las probetas 1, 2 y 3 colmatadas y barridas. Todos los ajustes pasan por el punto (0,0), sin embargo los ajustes de la infiltración con pendientes de 8% y 10% no ofrecen valores positivos de la infiltración hasta distancias recorridas por la escorrentía superficial de 8 cm y a 14 cm desde el origen, respectivamente.

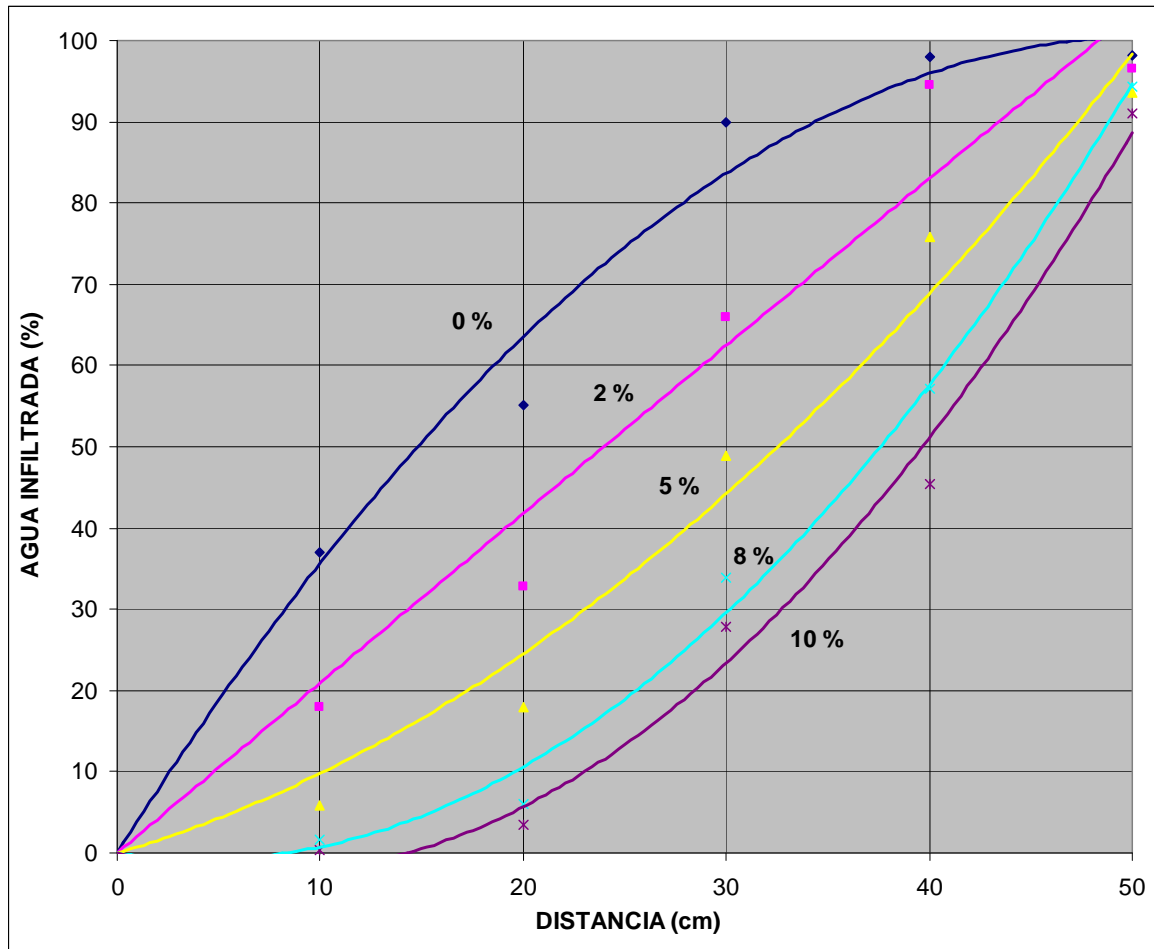


Figura IV-36. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada en función de la distancia recorrida para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo con mantenimiento.

La Tabla IV-12 recoge la ecuación y el coeficiente de determinación de cada uno de los ajustes representados en la Figura IV-36. Comparando los signos de los términos de estos ajustes con los correspondientes a la superficie colmatada al máximo sin mantenimiento se observan cambios que indican la variación en la forma de las curvas para las tres primeras inclinaciones. Así, para las pendientes de 0% y 2%, los signos negativo y positivo, de los términos cuadrático y lineal (-, +) muestran una buena capacidad de infiltración.

Tabla IV-12. Ajustes del porcentaje de agua infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d) para cada inclinación del pavimento de mezcla bituminosa porosa colmatada al máximo con mantenimiento.

Inclinación	Ajuste del porcentaje de agua en infiltrada (%_{infiltrado}) en función de la distancia en cm (d).	Coefficiente de determinación (R²)
0%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0390 \cdot d^2 + 3,9575 \cdot d$	0,9617
2%	$\%_{\text{infiltrado}} = -0,0007 \cdot d^2 + 2,1032 \cdot d$	0,9441
5%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0247 \cdot d^2 + 0,7330 \cdot d$	0,9722
8%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0455 \cdot d^2 - 0,3791 \cdot d$	0,9933
10%	$\%_{\text{infiltrado}} = 0,0497 \cdot d^2 - 0,7100 \cdot d$	0,9873

En resumen, se puede extraer que una franja de 50 cm de pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa con permeabilidad creciente con la profundidad (probetas 1, 2 y 3), colmatada al máximo y posteriormente barrida, es capaz de infiltrar sobradamente el 100% del agua aportada en el ensayo de resistencia a la colmatación con el ICF, tanto nivelada al 0% como con una inclinación del 2%. Además, la misma superficie, pero con el 10% de inclinación, es capaz de infiltrar cerca un 90% del agua.

Estos resultados son semejantes a los correspondientes a la superficie recién colocada, detectándose incluso una mayor infiltración en algunos casos, probablemente debida a la retención que puede proporcionar una carga ligera de sedimentos sobre una superficie permeable. Así, comparando la Figura IV-36 con la Figura IV-29 para el caso de pendientes altas de 8% y 10%, se observa una mejora en la capacidad de infiltración que puede asociarse a la presencia del sedimento. Este efecto positivo de una cantidad baja de sedimentos sobre la superficie, sin llegar a colmatar los huecos libres para la infiltración, puede ser debido a que su presencia aumenta la capacidad de absorción de la superficie permeable, eliminando la tensión superficial del aglomerado recién colocado y conduciendo el agua hacia los huecos, facilitando su infiltración. Esta influencia queda más patente con inclinaciones altas donde la velocidad de la lámina de agua de la escorrentía superficial es mayor y se ve más afectada por este efecto de retención y captación superficial.

IV.2.3 COMPARACIÓN

En este apartado únicamente se recoge la discusión de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la colmatación. La comparación de la resistencia a la colmatación de los pavimentos permeables de adoquines con ranuras y de mezcla bituminosa porosa no debe tomarse como único criterio para la selección de una de estas superficies. En cada aplicación particular con sus condiciones específicas, será necesario tener en cuenta una serie de parámetros que no sólo representen la funcionalidad del pavimento permeable, sino también su durabilidad, economía o estética.

De los distintos escenarios de colmatación ensayados en el ICF con ambos tipos de pavimento permeable, tan sólo se pueden comparar estrictamente los resultados de los estados de superficie recién colocada. Estos son los únicos escenarios que ofrecen una igualdad completa de condiciones de colmatación, dada su ausencia. La Figura IV-37 presenta los valores de la infiltración total recogida en las cinco cámaras situadas bajo las muestras de pavimento permeable en el ICF. Los valores correspondientes a la mezcla porosa han sido obtenidos como media de las seis probetas ensayadas. Los valores de ambas superficies son muy semejantes y se encuentran siempre por encima del 80% de infiltración total. Sin embargo, se pueden observar algunas diferencias como un mejor comportamiento de la mezcla bituminosa porosa al aumentar la inclinación, tendencia tan sólo interrumpida por el valor correspondiente al 8% de pendiente. Este valor es debido a la influencia de las probetas 4, 5 y 6 de mezcla bituminosa porosa (82,3%) que baja el promedio correspondiente a las probetas 1, 2 y 3 (92,9%). En resumen, recién colocadas las superficies, puede afirmarse que un pavimento permeable horizontal de adoquines con ranuras elípticas tiene mejor rendimiento que uno de mezcla bituminosa porosa, mientras que si el pavimento cuenta con alguna inclinación es la superficie de mezcla bituminosa porosa la que ofrece una infiltración mejor.

Abordando los distintos escenarios de colmatación ensayados, los únicos que pueden ser objeto de comparación, por contar con la misma carga de sedimento (2 kg/m^2), son el escenario 2 de superficie semi-colmatada de adoquines con ranuras y el escenario 2 de superficie colmatada al máximo de mezcla bituminosa porosa. Así, la Figura IV-38 muestra los resultados de infiltración total recogida bajo las muestras de $0,25 \text{ m}^2$, tanto de adoquines con ranuras elípticas como de mezcla bituminosa porosa. Se puede observar claramente como el pavimento permeable de adoquines soporta mucho mejor esta carga de sedimento, asegurando infiltraciones por encima del 85% en todos los casos. Mientras, esta carga de sedimento colmata al máximo la superficie de mezcla bituminosa porosa pero no reduce de manera crítica su capacidad de infiltración, dado que el mínimo registrado es del 63%.

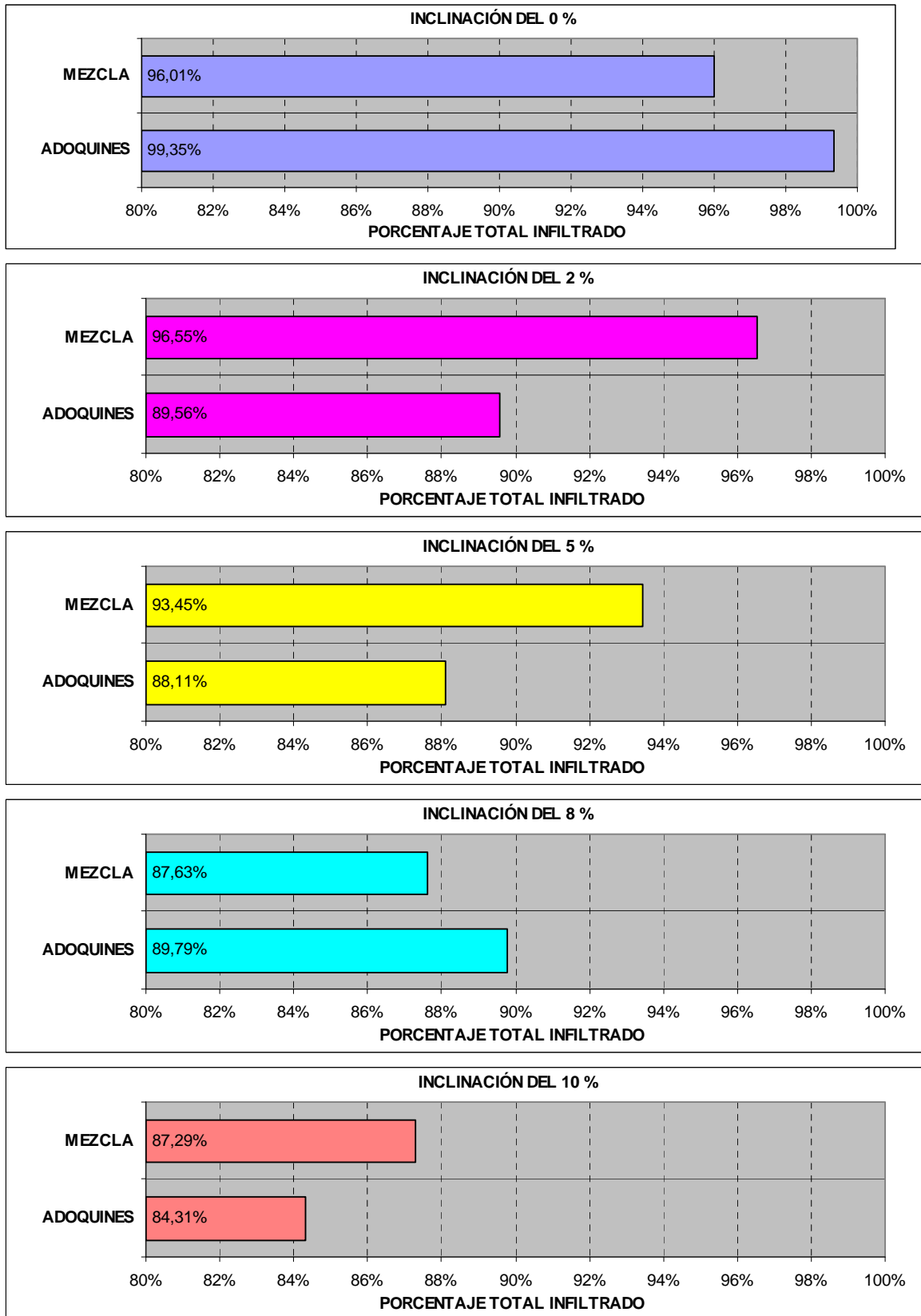


Figura IV-37. Porcentajes totales infiltrados para cada inclinación de los pavimentos permeables de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa recién colocados.

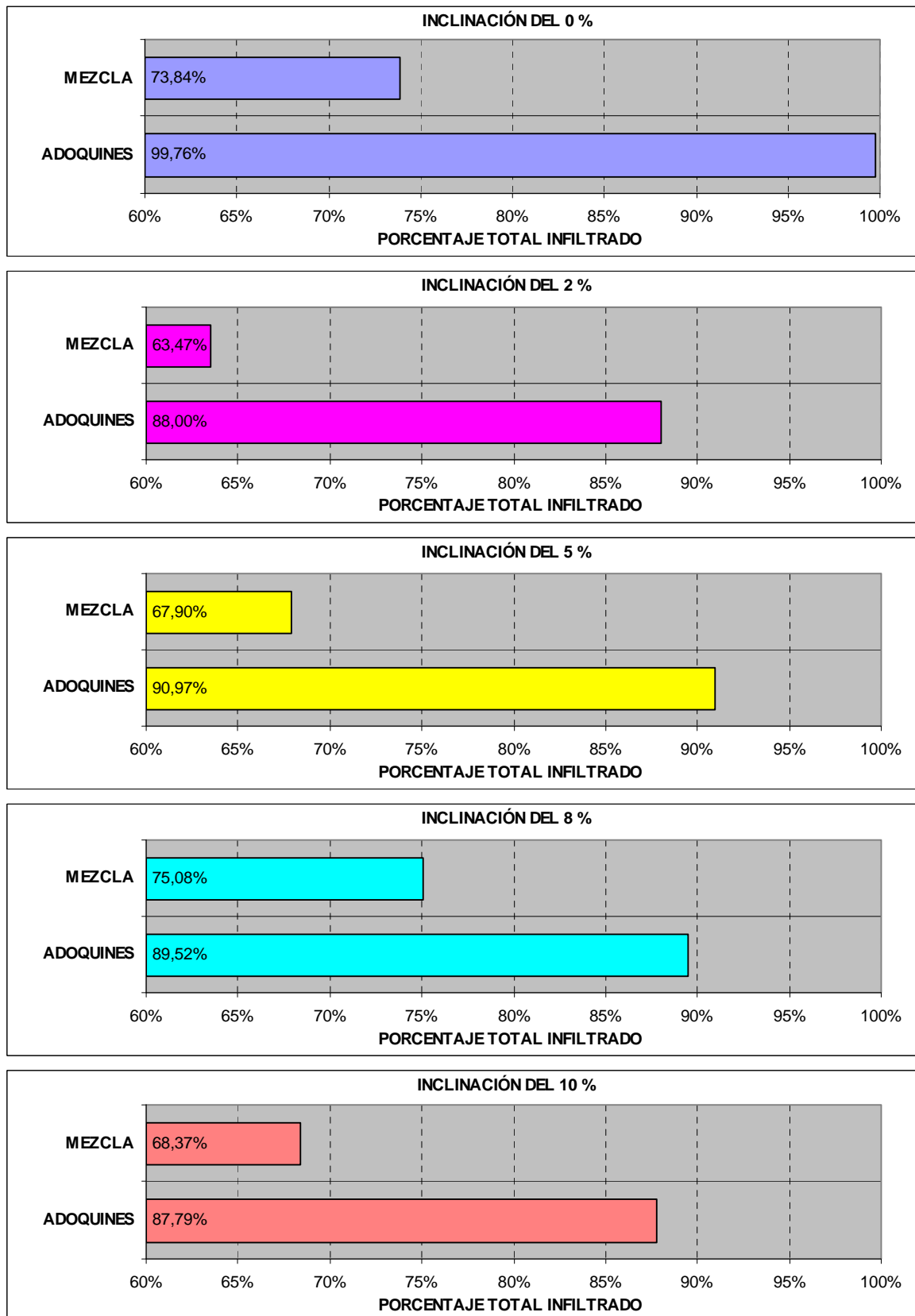


Figura IV-38. Porcentajes totales infiltrados para cada inclinación de los pavimentos permeables de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa con una carga de sedimento de 2 kg/m^2 .

Es posible realizar otra comparación empleando el parámetro de resistencia a la colmatación (RC), presentado en el estudio de las distintas geometrías de adoquines con ranuras. Así, multiplicando el promedio de la infiltración total obtenida con la carga de sedimento de 2 kg/m^2 y las cuatro inclinaciones, por el tanto por uno de sedimento utilizado para simular la colmatación máxima, respecto al mayor de la comparación (en este caso la referencia sería la carga de 5 kg/m^2 necesaria para simular la colmatación máxima del pavimento de adoquines con ranuras elípticas), se obtiene el valor del parámetro de resistencia a la colmatación (RC) para cada tipo de pavimento ensayado (Tabla IV-13). Comparando ambos valores, se observa claramente la mayor resistencia a la colmatación que ofrecen los pavimentos de adoquines con ranuras elípticas respecto a los pavimentos permeables de mezcla bituminosa porosa ensayados.

Tabla IV-13. Obtención del parámetro de resistencia a la colmatación (RC) de pavimentos permeables de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa.

Parámetro		Pavimento permeable	
		Adoquines con ranuras elípticas	Mezcla bituminosa porosa
Promedio de infiltración con la carga de sedimento de 2 kg/m^2	A	91,2%	69,7%
Tanto por uno de sedimento respecto al máximo	B	1,0	0,4
Resistencia a la colmatación (RC)	AxB	91,2%	27,9%

Aparte de la infiltración total y el valor del parámetro de resistencia a la colmatación, otro parámetro que permite la comparación de los distintos pavimentos permeables puede ser el valor de la longitud de máximo drenaje en los diferentes escenarios ensayados. Las cinco cámaras de recogida de agua, infiltrada a través del pavimento permeable, con las que cuenta el ICF permiten conocer la evolución de la distancia a la que se produce la máxima infiltración, tanto al variar el escenario de colmatación o como al cambiar la inclinación de la superficie ensayada. La Tabla IV-14 presenta un resumen de las longitudes de máximo drenaje correspondientes a los diferentes ensayos realizados con el pavimento de adoquines con ranuras elípticas. Se puede observar como los valores aumentan al aumentar la inclinación o la carga de sedimentos hasta sobrepasar los 50 cm en los casos de infiltración mínima a través de la muestra. La única excepción sería el valor de 30 cm correspondiente a la superficie semi-colmatada con un 10% de inclinación, motivado tan sólo por un 3% de diferencia entre las cantidades recogidas en las cámaras 3 y 5 en ese caso.

Tabla IV-14. Longitud de máximo drenaje del pavimento de adoquines con ranuras para cada estado de colmatación e inclinación de la superficie.

Estado de los adoquines con ranuras	Carga de sedimento (kg/m ²)	Longitud de máximo drenaje (cm) para cada inclinación				
		0%	2%	5%	8%	10%
Recién colocados	0,000	10	30	30	30	50
Semi-colmatados	2,000	10	30	30	30	30
Colmatados	4,000	30	30	50	50	50
Colmatados al máximo	4,986	>50	>50	>50	>50	>50
Colmatados al máximo con mantenimiento	4,941	>50	>50	>50	>50	>50

Por su parte, la Tabla IV-15 presenta un resumen de las longitudes de máximo drenaje correspondientes a los diferentes ensayos realizados con el pavimento de mezcla bituminosa porosa. Se puede observar como los valores también aumentan al incrementar la inclinación o la carga de sedimentos hasta sobrepasar los 50 cm en los casos de infiltración mínima. No cumplen esta tendencia los valores de 50 cm correspondientes a la superficie colmatada al máximo, motivados por la acumulación de sedimentos en la parte final de la superficie, evitando la generación de escorrentía. Se observa además, como el pavimento de mezcla bituminosa porosa con permeabilidad decreciente (probetas 4, 5 y 6) presenta peores longitudes de máximo drenaje que el pavimento de mezcla bituminosa porosa con permeabilidad creciente al tener la cara más cerrada hacia arriba (probetas 1, 2 y 3).

Tabla IV-15. Longitud de máximo drenaje del pavimento de mezcla bituminosa porosa para cada estado de colmatación e inclinación de la superficie.

Estado de la mezcla bituminosa porosa	Carga de sedimento (kg/m ²)	Longitud de máximo drenaje (cm) para cada inclinación				
		0%	2%	5%	8%	10%
Recién colocada (probetas 1, 2 y 3)	0,000	10	30	30	50	50
Recién colocada (probetas 4, 5 y 6)	0,000	30	30	40	50	50
Colmatada al máximo (probetas 4, 5 y 6)	2,000	30	>50	>50	50	50
Colmatada al máximo con mantenimiento (probetas 1, 2 y 3)	0,747	10	30	30	50	50

En función de los valores de la longitud de máximo drenaje, se pueden agrupar los diferentes estados de los pavimentos permeables ensayados en dos categorías según su capacidad de infiltración:

- Categoría A: asegura una capacidad de infiltración buena, con el máximo drenaje dentro de los primeros 50 cm de pavimento permeable.
- Categoría B: asegura una capacidad de infiltración mala, con el máximo drenaje fuera de los primeros 50 cm de pavimento permeable.

Con este criterio, los pavimentos permeables de adoquines con ranuras elípticas recién colocados, semi-colmatados e incluso colmatados (hasta 4 kg/m^2 de carga de sedimento sobre la superficie), estarían dentro de la categoría A. Mientras que los pavimentos permeables de adoquines con ranuras elípticas colmatados al máximo, con o sin mantenimiento (en torno a los 5 kg/m^2 de carga de sedimento) estarían incluidos en la categoría B. Por su parte, los pavimentos permeables de mezcla bituminosa porosa recién colocada e incluso colmatada al máximo y barrida (hasta 1 kg/m^2 de carga de sedimento), estarían dentro de la categoría A. Mientras que los pavimentos permeables de mezcla bituminosa porosa colmatados al máximo (en torno a los 2 kg/m^2 de carga de sedimento) estarían incluidos en la categoría B.

Si se comparan las categorías de estado de los dos tipos de pavimentos permeables, se puede observar como el pavimento permeable de adoquines soporta una carga de sedimentos cuatro veces mayor dentro de la categoría A, que asegura una buena capacidad de infiltración. Esta diferencia se debe a que los adoquines disponen de un mayor volumen libre y accesible para alojar el sedimento. Así, dado que cada adoquín de $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ con ranuras elípticas dispone de 60 cm^3 de volumen libre, en $0,25 \text{ m}^2$ de pavimento permeable construido con estos adoquines el volumen que puede ser ocupado por el sedimento es de 750 cm^3 . Mientras, una probeta de $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ de mezcla bituminosa porosa con 29,4% de huecos de media dispone de 7350 cm^3 libres. Sin embargo, este volumen libre no es accesible al sedimento dado el menor tamaño de los huecos en la mezcla bituminosa porosa y la fuerte dependencia del grado de abertura de la superficie y de la interconectividad entre los huecos. Así, aún considerando que el sedimento pueda penetrar 1 cm en la probeta ocupando todos los huecos, lo cual del 10%, el volumen disponible sería menor que el de los adoquines, al igual que los tamaños de las partículas que lo ocuparían. Por tanto, quedan patentes las diferencias que condicionan los resultados de resistencia a la colmatación obtenidos.

Respecto a los distintos efectos de la simulación de mantenimiento realizada sobre los dos tipos de pavimento, se observa claramente la mayor efectividad del barrido realizado sobre la mezcla bituminosa porosa, consiguiendo recuperar la categoría A para el pavimento. Así, el barrido sí fue capaz de remover el sedimento que bloqueaba los huecos de la superficie de mezcla bituminosa porosa, bastante cerrada al sedimento de por sí. Sin embargo, este barrido

superficial no resultó en absoluto efectivo en el caso de adoquines con ranuras, manteniéndose en la categoría B con una mala capacidad de infiltración. Este hecho se debe a que el barrido afecta a la parte superficial del pavimento y no al volumen interno de las ranuras. Por tanto, en el caso de adoquines con ranuras sería necesario completar el barrido superficial con un aspirado para retirar el sedimento de las ranuras, siendo la eficiencia del aspirado mayor cuando el sedimento no se encuentre compactado.

Otro método de comparación de ambos pavimentos puede ser el análisis de los ajustes del porcentaje de infiltración en función de la distancia. Así, comparando los distintos ajustes cuadráticos presentados para cada escenario y cada inclinación, se puede observar como la capacidad de infiltración empeora tanto con el aumento de la carga de sedimento sobre la superficie como con el incremento de inclinación. Además, las buenas capacidades de infiltración particulares están asociadas a curvas convexas, con signos negativo y positivo en los términos del ajuste (-, +), fundamentalmente situadas por encima de la diagonal del área del gráfico (por el ejemplo el ajuste del 0% en la Figura IV-19). Mientras, los estados con peor capacidad de infiltración están asociados a curvas cóncavas con signos positivo y negativo en los términos del ajuste (+, -), fundamentalmente situadas por debajo de la diagonal. Las primeras suponen una mayor infiltración recogida en las primeras cámaras del ICF y las segundas en las últimas cámaras. Sin embargo, como resumen de los resultados obtenidos con ambas superficies permeables, se hace necesario plantear ajustes globales que permitan su comparación, expresando el porcentaje infiltrado (I) en función de las siguientes variables:

- Distancia respecto a la línea de aportación de escorrentía superficial en cm (d).
- Carga de sedimento que soporta la superficie en kg/m² (s).
- Inclinación de la superficie en % (i).

Los análisis de regresión de los resultados obtenidos con cada uno de los dos pavimentos permeables ensayados están detallados en el *Anexo 2: Resistencia a la colmatación de pavimentos permeables*. La Tabla IV-16 recoge los dos ajustes que se han considerado más adecuados para esta comparación.

Tabla IV-16. Ajustes propuestos para explicar el porcentaje infiltrado medido con el ICF (I) en función de la distancia desde la línea de entrada de la escorrentía superficial (d), la carga de sedimento sobre la superficie (s) y la inclinación del pavimento (i).

Pavimento permeable	Ajuste planteado	Coefficiente de determinación
Adoquines con ranuras	$I=24,234 \cdot \ln(d) - 1,795 \cdot s^2 - 4,004 \cdot i$	$R^2=0,860$
Mezcla bituminosa porosa	$I=23,403 \cdot \ln(d) - 5,095 \cdot s^2 - 4,749 \cdot i$	$R^2=0,860$

En los dos modelos planteados el valor mínimo de distancia (d) a considerar es de 1 cm y los valores negativos de la infiltración (I) carecen de sentido. Recordar que el porcentaje de infiltración (I) se refiere al total de agua recogida durante el ensayo con el ICF; es decir, a la suma del total infiltrado en los 50 cm de muestra más la escorrentía residual. Estos ajustes podrían aplicarse del lado de la seguridad a pavimentos permeables sometidos a aguaceros de periodo de retorno menor de veinte años, con una cuenca impermeable adyacente de superficie menor que la del pavimento permeable. Las representaciones de los ajustes planteados se pueden realizar introduciendo la inclinación de la superficie a construir. Por ejemplo, con el 2% de inclinación, la Figura IV-39 corresponde a los adoquines con ranuras elípticas y la Figura IV-40 corresponde a la mezcla bituminosa porosa.

Adoquines con ranuras

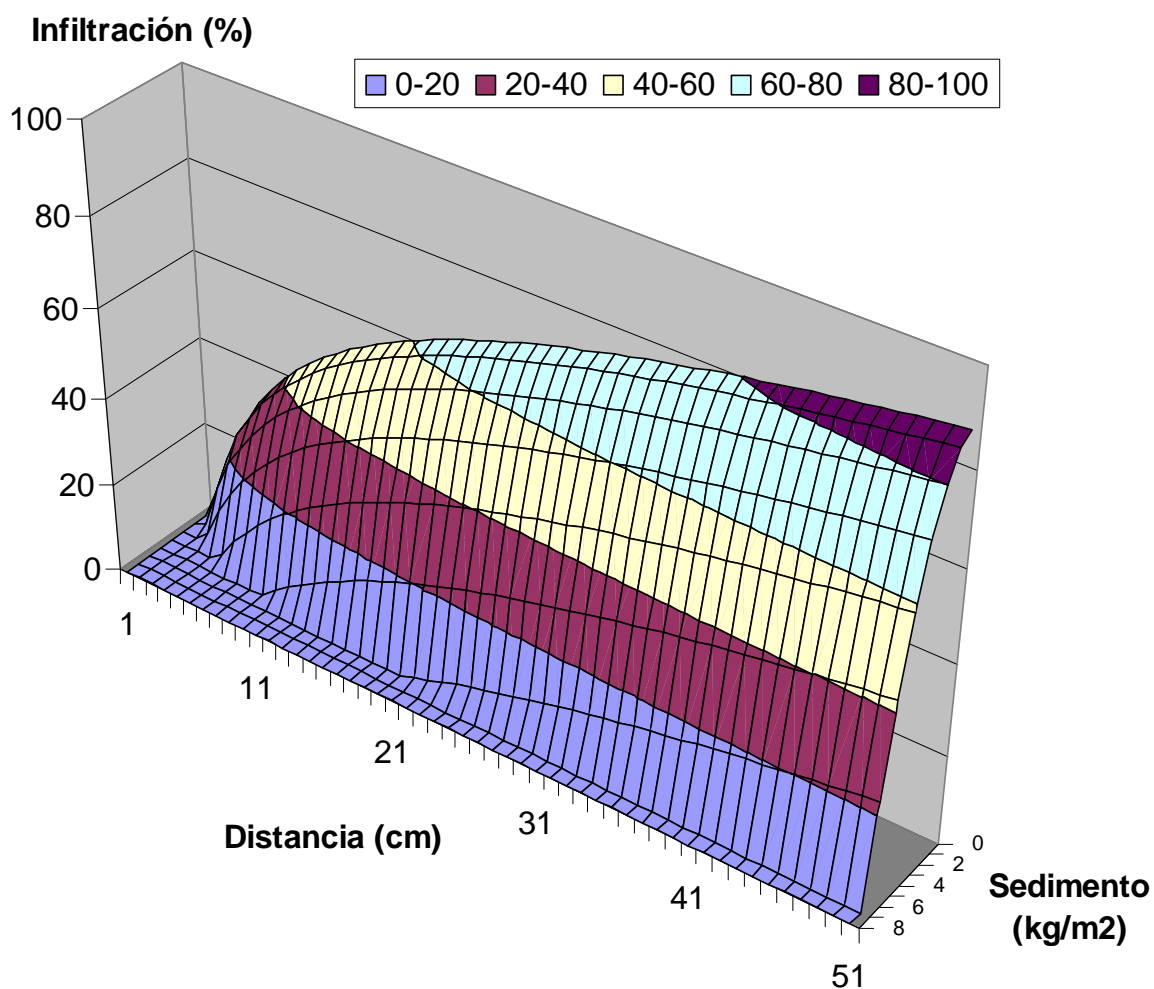


Figura IV-39. Porcentaje de infiltración en función de la distancia desde la línea de entrada de la escorrentía superficial y de la carga de sedimento sobre la superficie para un pavimento de adoquines con ranuras con una inclinación del 2%.

Mezcla bituminosa porosa

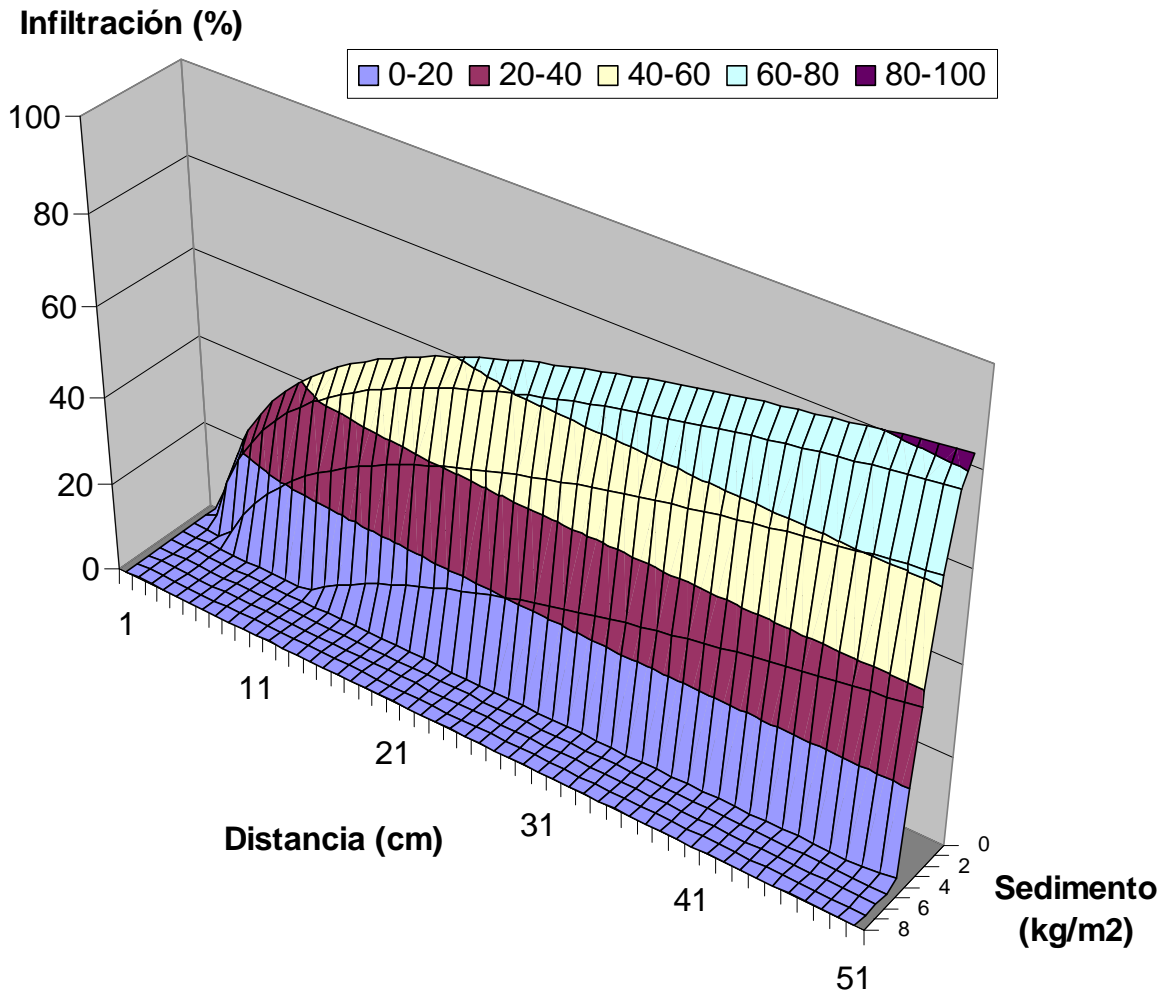


Figura IV-40. Porcentaje de infiltración en función de la distancia desde la línea de entrada de la escorrentía superficial y de la carga de sedimento sobre la superficie para un pavimento de mezcla bituminosa porosa con una inclinación del 2%.

Comparando ambos ajustes (Tabla IV-16), se puede observar como, al aumentar la distancia, los adoquines aseguran un mayor porcentaje de infiltración que la mezcla bituminosa porosa. Además, el impacto negativo de la carga de sedimento es aproximadamente tres veces menor en los adoquines que en la mezcla bituminosa porosa. Por su parte, la influencia negativa de la inclinación de la superficie es prácticamente del mismo orden en ambas superficies, siendo ligeramente superior en el caso de la mezcla bituminosa porosa. Por último, comentar como la influencia negativa del cuadrado de la carga del sedimento es menor que la influencia de la inclinación para los adoquines, mientras que en la mezcla bituminosa porosa prima la influencia negativa del cuadrado de la carga de sedimentos.

IV.2.4 CONCLUSIONES PARCIALES

Del análisis y discusión de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la colmatación de pavimentos permeables de adoquines con ranuras elípticas y de mezcla bituminosa porosa, se extraen las siguientes conclusiones parciales:

- Recién colocados, los adoquines con ranuras elípticas tienen mejor capacidad de infiltración con la superficie horizontal, mientras que la mezcla bituminosa porosa PA-12 ofrece un mejor comportamiento al aumentar la inclinación de la superficie.
- Los porcentajes de infiltración mínimos con las superficies recién colocadas se dan con un 10% de inclinación, siendo del 84% para el pavimento de adoquines con ranuras elípticas y del 87% para la mezcla bituminosa porosa PA-12.
- Colmatados al máximo con una carga de sedimento de 5 kg/m^2 , los adoquines con ranuras elípticas, de 10 cm de espesor, presentan un porcentaje de infiltración mínimo del 9% con una inclinación de la superficie del 10%.
- Colmatada al máximo con una carga de sedimento de 2 kg/m^2 , la mezcla bituminosa porosa, con un 29% de huecos en mezcla de media, infiltra un 76%, con una inclinación de la superficie del 10%.
- Para ambas superficies, una carga ligera de sedimentos que no llegue a bloquear las ranuras o huecos, puede tener un efecto beneficioso, especialmente con inclinaciones elevadas, al retener el flujo de la escorrentía superficial.
- La longitud de máximo drenaje, o distancia a la que se produce la máxima infiltración, aumenta hasta sobrepasar los 50 cm de la muestra al incrementar la inclinación o la carga de sedimentos sobre la superficie.
- Se pueden agrupar los estados de los pavimentos permeables en dos categorías:
 - Categoría A: buena infiltración, adoquines con ranuras con carga de sedimentos hasta 4 kg/m^2 y mezclas bituminosas porosas hasta 1 kg/m^2 .
 - Categoría B: mala infiltración, adoquines con sedimentos en torno a los 5 kg/m^2 y mezclas bituminosas porosas en torno a los 2 kg/m^2 .
- El barrido superficial de un pavimento de adoquines completamente colmatado no sirve para recuperar la capacidad de infiltración del mismo, debido a que las partículas colmatantes se encuentran compactadas en el interior de las ranuras.
- El barrido superficial de un pavimento de mezcla porosa sirve para recuperar gran parte de la capacidad de infiltración del mismo, debido a que la mayoría de las partículas colmatantes no llegan a penetrar en el interior de la mezcla.
- Para seleccionar entre los dos tipos de pavimentos permeables ensayados cuál es el más adecuado para una aplicación particular, se deben tener en cuenta otros factores como por ejemplo la durabilidad, economía o estética.

IV.3 CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN CAMPO

Los resultados de los ensayos de infiltración en campo con el permeámetro LCS y con el ICP (Infiltrómetro Cántabro Portátil) se recogen en el *Anexo 3: Capacidad de infiltración en campo*.

IV.3.1 INFILTRACIÓN CON EL PERMEÁMETRO LCS

La Figura IV-41 muestra los resultados obtenidos con el permeámetro LCS en los tres puntos ensayados sobre cada una de las superficies urbanas objeto de comparación (Tabla III-8). Las capacidades de infiltración más bajas corresponden con valores altos de tiempo medido entre marcas del LCS.

Se puede observar como tres superficies aparecen como claramente permeables, con tiempos de infiltración entre marcas alrededor de los veinticinco segundos: mezcla bituminosa porosa con tráfico ligero (PA2) y las dos superficies con bloques prefabricados de hormigón (B1 y B2). Por otro lado, se detecta una única superficie impermeable con los tres puntos ensayados con resultados del tiempo de infiltración entre marcas por encima de los mil ochocientos segundos: la superficie de mezcla bituminosa nueva (A1).

Las superficies de césped reforzado (RG1 y RG2) tuvieron distinto comportamiento, resultando la segunda de ellas sensiblemente más permeable. Estos resultados son fundamentalmente debidos al tipo de terreno utilizado como relleno de los refuerzos y sustrato para el desarrollo del césped, siendo independientes del tipo de material de los refuerzos. Así, se comprobó que el terreno del césped reforzado con celdas de plástico (RG2) tenía una mayor infiltración debido a que presentaba un carácter arenoso, mientras que el terreno empleado con los refuerzos de hormigón (RG1) presentaba un carácter claramente más arcilloso y por tanto menos permeable.

En la Figura IV-41 también se puede observar como la capa de rodadura de mezcla bituminosa antigua (A2) presenta resultados irregulares, similares a los de la mezcla bituminosa porosa con alta intensidad de tráfico (PA1). Estos resultados de tiempos entre marcas representan: un punto impermeable, otro con una capacidad de infiltración media y un tercero cerca de ser considerado permeable. Con estos tres valores queda representada en ambos casos la variabilidad que es posible encontrar en este tipo de pavimentos, bien debido a la presencia de grietas o bien debido a bloqueos localizados de la superficie drenante.

Así, durante los ensayos se observó que, para la superficie de mezcla bituminosa

antigua (A2), los puntos aparentemente permeables eran debidos a pérdidas laterales de agua favorecidas por grietas e irregularidades. Mientras, en el caso de la mezcla bituminosa porosa con alta intensidad de tráfico (PA1), el punto impermeable y el punto con media permeabilidad representan zonas colmatadas, debido a la degradación de la superficie y al sedimento movilizado por el tráfico de la carretera hacia el arcén donde se realizó el ensayo.

Además, la Figura IV-41 muestra claramente las diferencias entre los pavimentos de mezcla bituminosa porosa (PA1 y PA2) para el análisis de los cuales fue diseñado el permeámetro LCS. Los valores de la mezcla bituminosa porosa con alta intensidad de tráfico (PA1) indican que necesita mantenimiento en algunas áreas para recuperar la capacidad de infiltración perdida. Mientras, la mezcla bituminosa porosa con uso ligero (PA2) presentó una buena capacidad de infiltración en los tres puntos ensayados.

Sin embargo, el permeámetro LCS no permite diferenciar los dos tipos de pavimentos con adoquines. Ambas superficies (B1 y B2) parecen permeables de acuerdo con los resultados recogidos en la Figura IV-41. Así, los tiempos de evacuación para el pavimento impermeable con adoquines (B1) no son representativos debido a que están fuertemente influenciados por las pérdidas de agua entre la goma de sellado del aparato y las juntas entre adoquines.

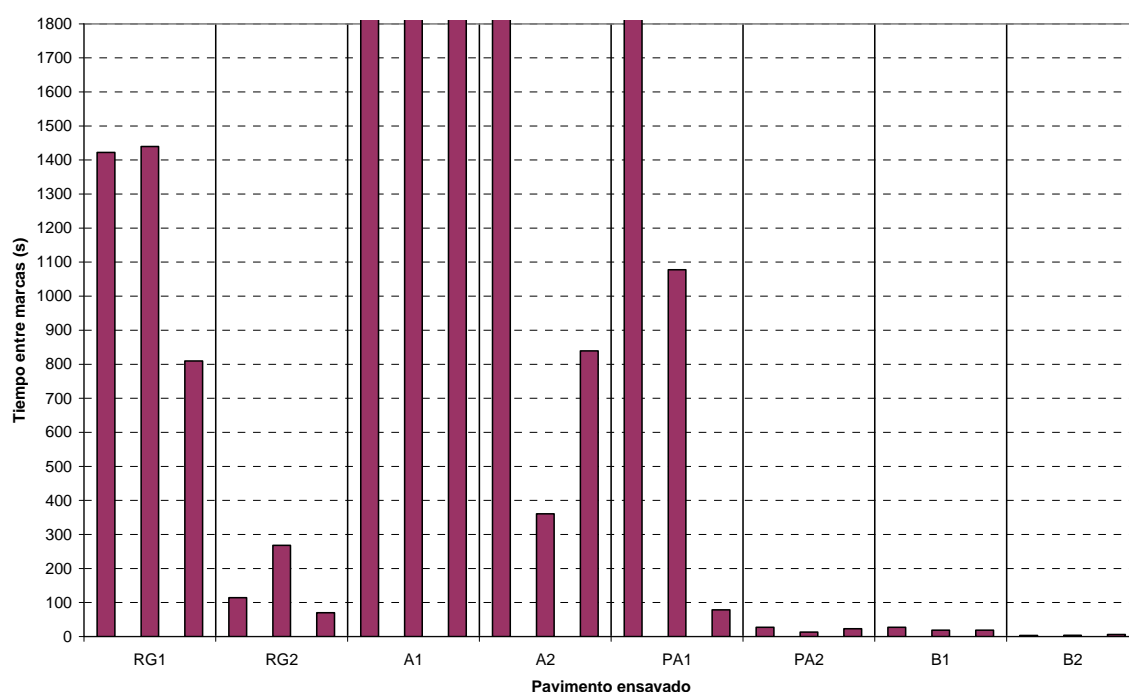


Figura IV-41. Tiempos de infiltración medidos con el permeámetro LCS sobre los diferentes pavimentos ensayados (Tabla III-8).

IV.3.2 INFILTRACIÓN CON EL ICP

La Figura IV-42 presenta los resultados obtenidos con el ICP en las tres áreas ensayadas sobre cada una de las superficies urbanas objeto de comparación (Tabla III-8). Las capacidades de infiltración más bajas están asociadas con las mayores alturas de agua en la cámara de inundación, para cada uno de los periodos de retorno ensayados.

En la Figura IV-42, se puede observar claramente como dos superficies permeables fueron capaces de soportar las tres intensidades de lluvia simuladas sin generar ninguna altura de agua en la cámara de inundación. Los pavimentos que no presentaron ningún problema de inundación en las tres áreas ensayadas fueron: mezcla bituminosa porosa con tráfico ligero (PA2) y adoquines con juntas libres sin recebo (B2).

Por otro lado, se detecta la superficie impermeable de mezcla bituminosa (A1), la cual, como era de esperar, registró alturas de inundación importantes: por encima de 2 cm para la intensidad de lluvia con periodo de retorno T=10 años; sobre 2,5 cm de inundación con la precipitación de T=50 años y alrededor de 3,5 cm con la de T=500 años.

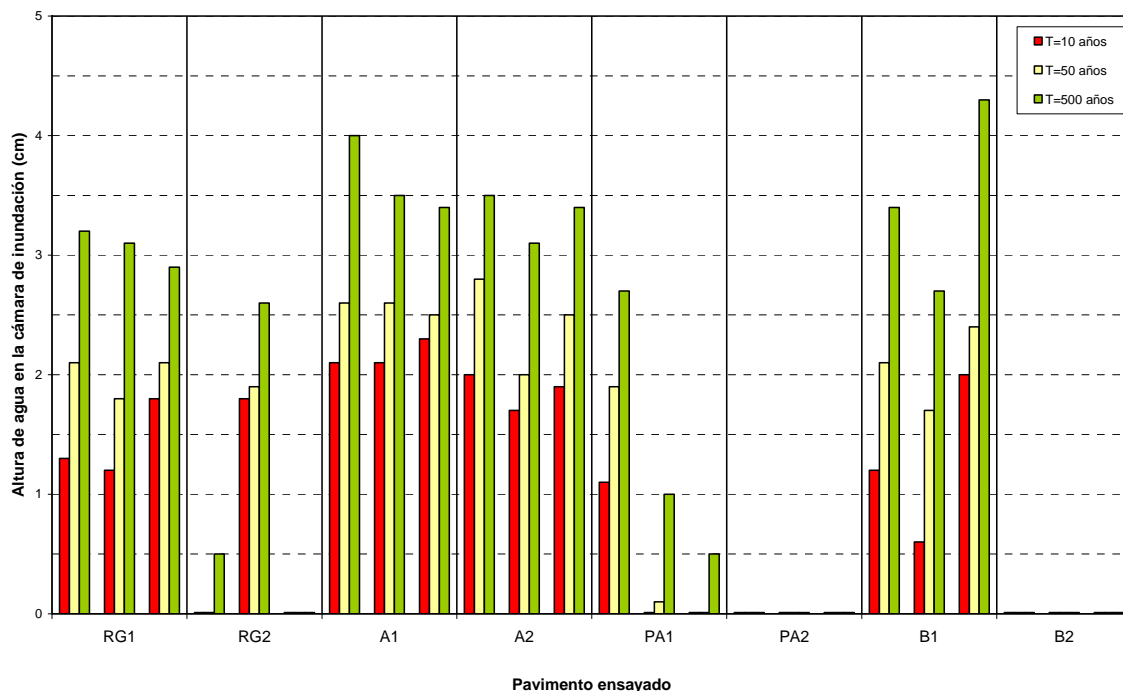


Figura IV-42. Alturas de inundación medidas con el ICP para cada periodo de retorno sobre los diferentes pavimentos ensayados (Tabla III-8).

El césped reforzado con celdas de hormigón (RG1) presenta resultados similares en las tres áreas ensayadas, mostrando una deficiente capacidad de infiltración, probablemente debida al relleno de tipo arcilloso. Por otra parte, los ensayos llevados a cabo en el césped reforzado con celdas de plástico (RG2) ofrecen una información contradictoria, dado que la primera y tercera áreas presentan unas capacidades de infiltración que pueden ser valoradas como buena y excelente, respectivamente; mientras que la segunda zona de ensayo presenta una capacidad de infiltración deficiente. Esta zona fue incapaz de infiltrar la precipitación de T=10 años debido a un pobre desarrollo del césped que hacía que el terreno permaneciese cerrado sin los huecos facilitados por las raíces.

Las diferencias entre los dos tipos de mezcla bituminosa porosa (PA1 y PA2) son representadas claramente en la Figura IV-42. Así, la mezcla bituminosa de la carretera transitada (PA1) tuvo valores deficientes que indican la necesidad de limpieza para recuperar la capacidad de infiltración perdida por el aporte de sedimentos debido al tráfico. Mientras la mezcla porosa poco transitada (PA2) presenta un comportamiento claramente permeable. Por otra parte, la superficie impermeable de mezcla bituminosa antigua (A2) presentó una baja capacidad de infiltración, aunque ligeramente mejor que la mezcla bituminosa nueva (A1). Con todo, ambas capas de rodadura de mezcla bituminosa (A1 y A2) pueden ser consideradas como superficies impermeables, si bien la antigüedad hace que la capacidad de infiltración aumente debido principalmente a la abertura de grietas.

Respecto a los pavimentos de adoquines, se puede observar en la Figura IV-42 como la superficie de adoquines con juntas selladas con mortero (B1) muestra un grado de impermeabilidad importante, con valores altos de las alturas de inundación. Por el contrario, la superficie de adoquines con juntas abiertas (B2) presenta un comportamiento completamente permeable.

Comparando los resultados obtenidos con las alturas de calibración medidas sobre una placa metálica (Tabla III-10), se detectan dos medidas por encima del máximo de 3,6 cm de altura de inundación para el periodo de retorno de 500 años:

- 4 cm para la superficie impermeable de aglomerado asfáltico (A1).
- 4,3 cm para la superficie impermeable de adoquines (B1).

Estos altos valores medidos pueden tener fundamentalmente dos causas:

- Una irregularidad superficial que haya aumentado el volumen sólido en el interior de la cámara de inundación.
- Un aumento de la intensidad de lluvia simulada durante el ensayo.

La irregularidad superficial puede llegar a causar errores de milímetros en el apoyo del elemento interior de medición de la altura de inundación; sin embargo, se intentó minimizar este efecto durante la realización de los ensayos. Respecto a la intensidad de lluvia simulada durante el ensayo, se realizó una comprobación final de la calibración inicial que sirvió para constatar el hecho de que la intensidad simulada había aumentado ligeramente para las mismas alturas de agua en la cámara de carga. Por tanto, es posible que los resultados de altura de inundación correspondan a intensidades de lluvia simulada mayores de lo previsto. En cualquier caso, con esta desviación al alza lo que se obtienen son valores del lado de la seguridad sin que en ningún caso estas variaciones hayan influido en la identificación y comparación de los distintos tipos de superficies.

IV.3.3 COMPARACIÓN

La comparación de los resultados obtenidos con los dos equipos empleados tiene como único objeto la comprobación de su rango de aplicación. Así, cada uno de ellos permite un nivel de diagnóstico determinado de la capacidad de infiltración de las diferentes superficies urbanas ensayadas, ya sean pavimentos permeables o impermeables.

La Tabla IV-17 muestra la media de los tres resultados para cada uno de los dos tipos de ensayos realizados sobre cada tipo de superficie.

Tabla IV-17. Promedios de las medidas realizadas con el permeámetro LCS y con el ICP sobre los distintos pavimentos ensayados (Tabla III-8).

Referencia del pavimento ensayado	Promedio de las medidas con el permeámetro LCS (s)	Promedio de las medidas con el ICP (cm)		
		T=10 años	T=50 años	T=500 años
RG1	1224	1,4	2,0	3,1
RG2	151	0,6	0,6	1,0
A1	>1800	2,2	2,6	3,6
A2	1233	1,9	2,4	3,3
PA1	1052	0,4	0,7	1,4
PA2	21	0,0	0,0	0,0
B1	22	1,3	2,1	3,5
B2	4	0,0	0,0	0,0
Placa metálica (calibración)	>1800	2,3	2,7	3,6

La superficie impermeable de mezcla bituminosa cerrada recién colocada (A1) muestra simultáneamente valores de tiempo de infiltración superiores a los mil ochocientos segundos de límite con el permeámetro LCS, y alturas de inundación semejantes a las registradas con la placa metálica empleada como calibración del ensayo con el ICP. Sin embargo, la superficie impermeable de adoquines (B1) tiene un tiempo de infiltración con el permeámetro LCS propio de una superficie permeable y unas alturas de inundación con el ICP próximas a las de la placa impermeable de referencia. Así, se puede constatar que el ICP es el único de los dos aparatos que con las condiciones de ensayo ofrece resultados válidos con pavimentos impermeables de adoquines.

Respecto a las superficies permeables, en la Tabla IV-17 se observa que las superficies de mezcla bituminosa porosa en buen estado y de adoquines permeables (PA2 y B2) presentan tiempos de infiltración por debajo de veinticinco segundos con el permeámetro LCS, y alturas de inundación de 0 cm, para las tres intensidades de lluvia simuladas con el ICP. Estos valores indican claramente una excelente capacidad de infiltración de ambas superficies, la cual puede ser identificada con cualquiera de los dos aparatos.

Para las superficies que no son claramente impermeables o permeables, el LCS ofrece una amplia escala de contraste con valores en segundos que pueden ir de 0 a 1800, límite marcado en esta ocasión. Si bien el resultado para una mezcla bituminosa porosa recién colocada debe ser inferior a cincuenta segundos, debiendo estar preferiblemente por debajo de los veinticinco o treinta y cinco segundos (Pérez y Calzada, 1990). Mientras, el ICP ofrece un menor rango de resultados posibles, aproximadamente entre 0,0 cm y 4,0 cm, pero gracias a las simulaciones de lluvia estos resultados tienen una interpretación directa al tratarse de alturas de inundación sobre la superficie ensayada.

Así, comparando los resultados de las superficies que no son claramente permeables o impermeables, se puede señalar con los resultados de los dos ensayos que el césped reforzado con prefabricados de hormigón (RG1) resulta más impermeable que el reforzado con piezas de plástico (RG2). Del mismo modo es posible detectar la degradación superficial sufrida por el pavimento de mezcla bituminosa antiguo (A2), que aún siendo impermeable presenta un cierto grado de infiltración. Sin embargo, en el caso del pavimento de mezcla bituminosa porosa con problemas de colmatación (PA1), el LCS muestra un promedio de resultados que es propio de una superficie impermeable degradada, mientras que los valores obtenidos con el ICP permiten diferenciarla claramente como más cercana a permeable. En estos casos, cualquiera que sea el aparato empleado, conviene consultar los valores obtenidos en cada punto o área de ensayo para localizar exactamente las zonas con más problemas de colmatación.

IV.3.4 CONCLUSIONES PARCIALES

De la aplicación del permeámetro LCS (Laboratorio de Caminos de Santander) y del ICP (Infiltrómetro Cántabro Portátil) a los diferentes tipos de pavimentos urbanos ensayados (Tabla III-8), se extraen las siguientes conclusiones parciales:

- El LCS permite analizar la capacidad de infiltración de puntos específicos de superficies continuas, permeables o impermeables, identificando claramente los puntos impermeables y el estado de bloqueo de superficies como la mezcla bituminosa porosa.
- El LCS no ofrece resultados representativos para superficies impermeables discontinuas de adoquines dado que el ensayo no fue diseñado para este tipo de superficies no regulares.
- La metodología de ensayo del LCS, como permeámetro con columna de agua que analiza un punto, es más rápida y sencilla que la del ICP, como infiltrómetro con simulador de lluvia que analiza un área determinada.
- El ICP permite analizar la capacidad de infiltración de áreas específicas de cualquier tipo de superficie, continua o discontinua, permeable o impermeable, identificando claramente zonas impermeables y zonas con infiltración en superficies de mezclas bituminosas porosas, pavimentos de adoquines o césped con refuerzos de hormigón.
- El ICP permite caracterizar la capacidad de infiltración de las superficies permeables, cuantificando su reacción frente a diferentes intensidades de lluvia en forma de altura de agua de inundación.
- Un pavimento permeable, mezcla bituminosa porosa o adoquines con ranuras, en buenas condiciones de conservación, asegura una altura de inundación de 0 cm frente a un aguacero de duración cinco minutos y periodo de retorno $T=500$ años, mientras que un pavimento impermeable produce una altura de inundación de aproximadamente 3,5 cm bajo el mismo aguacero simulado.
- Los resultados que ofrece el LCS pueden ser empleados para evaluar el correcto rendimiento fundamentalmente de los pavimentos permeables continuos, apoyando decisiones de mantenimiento de firmes permeables.
- Los resultados que ofrece el ICP pueden ser empleados para evaluar el correcto rendimiento de cualquier tipo de pavimento permeable, apoyando decisiones de diseño, construcción y mantenimiento de firmes permeables en función del régimen de precipitaciones correspondiente a cada localización.

IV.4 RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POROSAS A LOS VERTIDOS DE HIDROCARBUROS

Todos los resultados obtenidos en esta parte de la investigación están recogidos en el *Anexo 4: Resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos*. Se recuerda que los ensayos de resistencia de mezclas bituminosas a los vertidos de hidrocarburos se realizaron con la hipótesis de partida de que el betún convencional B60/70 era el más afectado por el vertido de hidrocarburos y el betún anticarburante BAC el menos afectado.

IV.4.1 ENSAYOS DE ESCURRIMIENTO

En los ensayos de escurrimiento de agua destilada y aceite usado de motor a través de probetas Marshall de mezclas bituminosas porosas fabricadas con distintos tipos de betunes los niveles de vertido ensayados fueron:

- Con el betún B 60/70: Nivel 0 (0 mg de aceite vertidos en total), Nivel 1 (271,1 mg), Nivel 2 (813,6 mg) y Nivel 3 (1356,0 mg).
- Con el betún BM-3b: Nivel 0, Nivel 2, Nivel 3 y Nivel 4 (1898,4 mg).
- Con el betún BAC: Nivel 0, Nivel 3, Nivel 4 y Nivel 5 (2440,8 mg).

En la Figura IV-43 se presentan los promedios de los resultados obtenidos en los ensayos de escurrimiento de las probetas fabricadas con los tres tipos de betún y sometidas a los distintos niveles de vertido de aceite usado de motor. En esta figura se representan además los correspondientes ajustes lineales de los desgastes obtenidos con cada betún para cada nivel de vertido, mostrando las tendencias de las mezclas bituminosas porosas ensayadas.

Según el ajuste planteado, las probetas fabricadas con betún B 60/70 tienen un desgaste creciente con el nivel de vertido, con un valor del 25% para el Nivel 3. Las probetas fabricadas con el betún B 60/70 y el ajuste granulométrico 1 se emplearon en los ensayos con vertidos de Nivel 0 (1/2 de las probetas ensayadas), Nivel 1 (1/3 de las probetas ensayadas) y Nivel 2 (3/5 de las probetas ensayadas). Este hecho explica los valores de 17,1% de desgaste con el Nivel 0 y de 22,4% con el Nivel 2, más bajos de lo esperado debido al menor porcentaje de huecos de estas probetas. Por su parte, el betún modificado BM-3b asegura niveles de desgaste inferiores al 20% para todos los niveles de vertido de aceite estudiados. De hecho, no se aprecia ninguna afección debida al escurrimiento, incluso una ligera mejora respecto al desgaste del 12,2% correspondiente a este tipo de mezcla en seco, sin ningún tipo de tratamiento. Respecto al comportamiento del betún anticarburante BAC, se puede observar cómo los valores de desgaste se encuentran en torno al 26% para los niveles más altos de vertido ensayados.

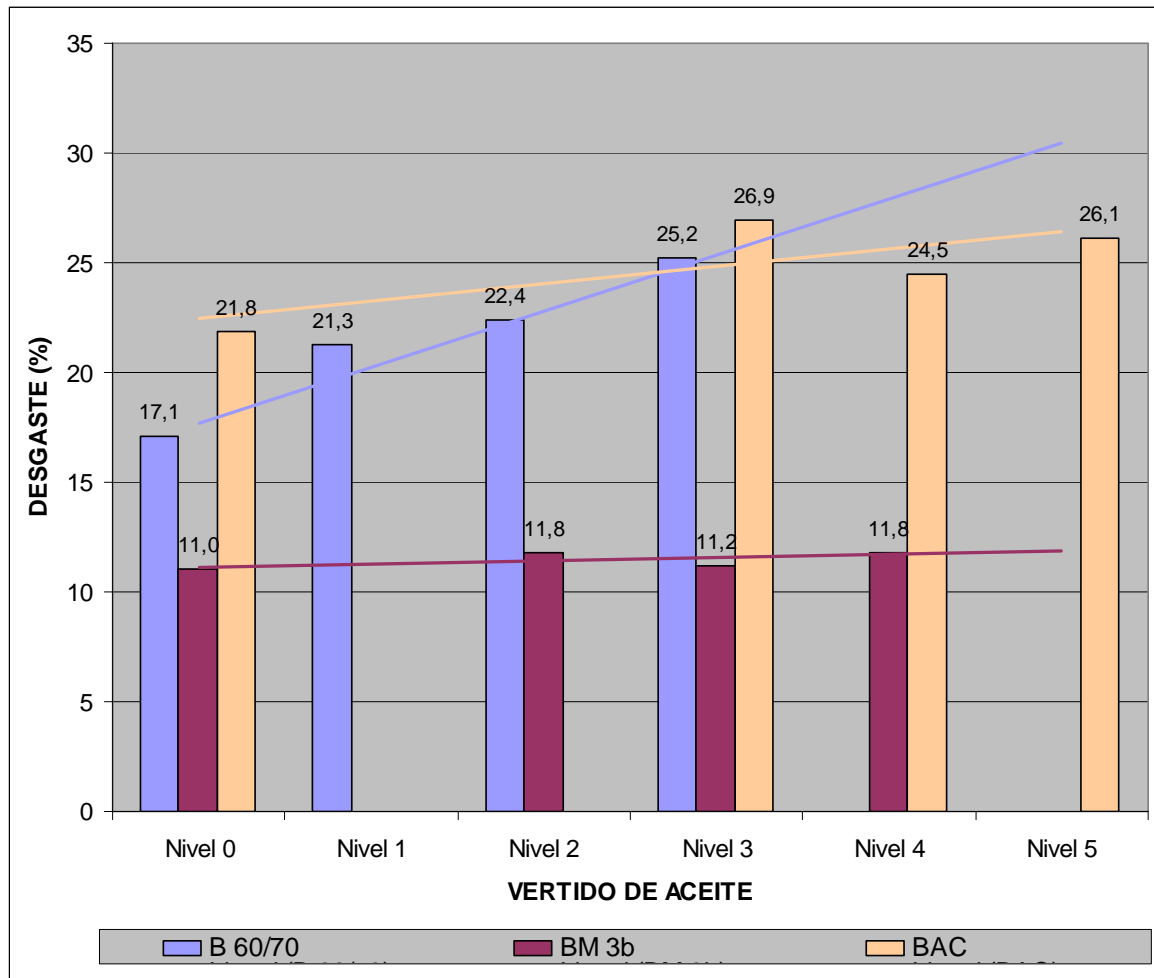


Figura IV-43. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún sometidas al escurrimiento de agua con aceite usado de motor.

Las ecuaciones de los ajustes lineales del desgaste en función del nivel de vertido mostrados en la Figura IV-43 quedan recogidas en la Tabla IV-18, junto con los correspondientes coeficientes de determinación. El betún de composición más homogénea, el B 60/70, muestra la mayor dependencia del desgaste respecto al nivel de vertido con un R^2 de 0,95. Mientras, los betunes modificados muestran una mayor independencia del nivel de vertido de aceite, con valores del coeficiente de determinación R^2 considerablemente más bajos. Así, se constata como el incremento del vertido de aceite no afecta al betún modificado BM-3b, el cual mantiene desgastes en torno al 12% para los mayores niveles de vertido.

Observando la Figura IV-43, se puede comprobar como hasta el Nivel 3 de vertido las mezclas fabricadas con betún BAC tienen menor resistencia al desgaste que el resto. Sin embargo, a partir del Nivel 3, la mezcla fabricada con el betún anticarburante BAC asegura mejores resistencias ante vertidos elevados de aceite que los valores extrapolados del ajuste

correspondiente al betún B 60/70. Por tanto, estaría justificado el uso del betún anticarburante BAC en mezclas bituminosas porosas con vertidos esperados de aceite por encima de 1350 mg con el objetivo de mantener niveles de desgaste en torno al 25%.

Tabla IV-18. Ajustes del porcentaje de desgaste en el ensayo cántabro (D) de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricada con cada tipo de betún en función del nivel de vertido (N) con la metodología de escurrimiento de agua con hidrocarburos.

Betún	Ajuste del desgaste (D) en función del nivel de vertido (N) de aceite usado de motor con el ensayo de escurrimiento.	Coefficiente de determinación (R ²)
B 60/70	$D = 2,5435 \cdot N + 17,6935$	0,9521
BM-3b	$D = 0,1421 \cdot N + 11,1271$	0,3762
BAC	$D = 0,7979 \cdot N + 22,4559$	0,5890

Dada la mayor afección del nivel de vertido sobre el betún B 60/70 y la mayor variación existente en los valores del porcentaje de huecos, debido al uso de dos ajustes granulométricos distintos, se decidió analizar más en detalle los resultados de este betún. En la Figura IV-44 se pueden observar los ajustes lineales planteados para el desgaste en función del porcentaje de huecos en mezcla, para los distintos niveles de vertido ensayados con el betún convencional B 60/70. La Tabla IV-19 recoge las ecuaciones y los coeficientes de determinación de estos ajustes, obtenidos sin considerar los puntos situados a más de una desviación típica del modelo. Los valores de R² se encuentran entre 0,5 y 0,8 por lo que estos ajustes sirven simplemente de orientación para mostrar tendencias, siendo necesario un estudio de un mayor número de variables para poder explicar un porcentaje mayor de la variable dependiente desgaste. Con todo, los valores de las pendientes de los ajustes de la Figura IV-44 están dentro de un mismo rango (de 2,9 a 4,6), en el que se encuentra también la pendiente del ajuste del desgaste en función de los huecos en el caso de las probetas control sin ningún tratamiento (4,1, ver último apartado del *Anexo 4: Resistencia de mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos*). Por tanto, el nivel de vertido no afecta a la relación del desgaste en función de los huecos en el rango estudiado, sino que aumenta directamente los valores obtenidos de desgaste en el ensayo cántabro.

Respecto a la afección del vertido de aceite, en la Figura IV-44 se observa un claro aumento del desgaste con el nivel de vertido para mezclas bituminosas porosas fabricadas con el betún B 60/70. Así, se comprueba como un Nivel 3 de vertido de aceite usado de motor significa un mayor desgaste que un Nivel 2, y este a su vez que un Nivel 1, siendo los menores desgastes los correspondientes al Nivel 0 de escurrimiento con agua sin aceite.

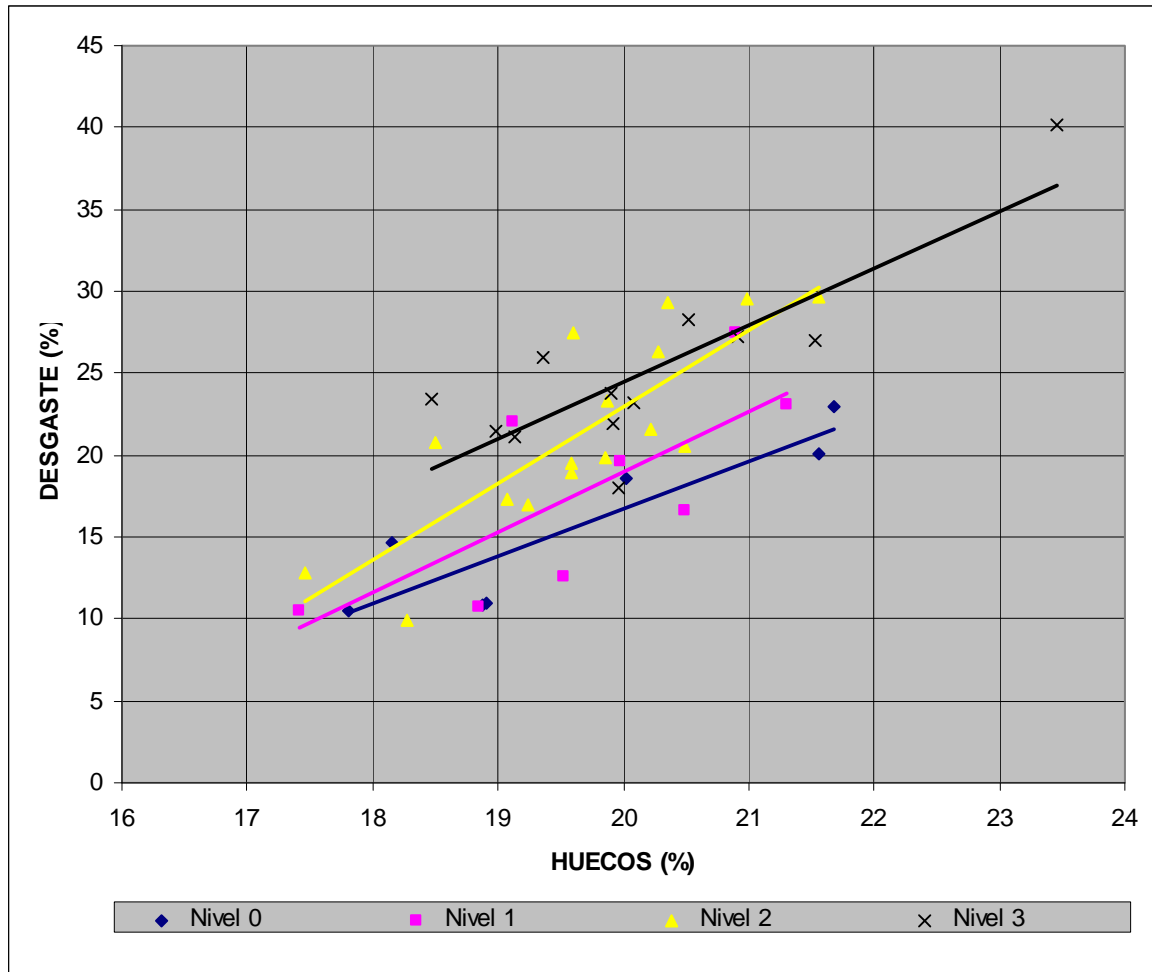


Figura IV-44. Ajustes del porcentaje desgaste en el ensayo cántabro en función de los huecos de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con betún convencional B 60/70 para los cuatro niveles de vertido de aceite usado de motor ensayados a escurrimiento.

Tabla IV-19. Ajustes del porcentaje de desgaste en el ensayo cántabro (D) de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricada con betún convencional B 60/70 en función del porcentaje de huecos (H) para cada nivel de vertido de hidrocarburos ensayado con la metodología de escurrimiento.

Nivel de vertido	Ajuste del desgaste en función del porcentaje de huecos de las mezclas con betún B 60/70 (Ensayo de escurrimiento).	Coefficiente de determinación (R^2)
0	$D = 2,8985 \cdot H - 41,2340$	0,7986
1	$D = 3,6999 \cdot H - 55,0420$	0,5485
2	$D = 4,6625 \cdot H - 70,2940$	0,6687
3	$D = 3,4756 \cdot H - 45,0290$	0,6885

Por último, la Tabla IV-20 presenta los promedios de los resultados de desgaste correspondientes a las probetas control, sin vertido de agua ni hidrocarburo, además de los promedios correspondientes a las probetas ensayadas a escurrimiento con Nivel 0 de vertido (sólo agua) y Nivel 3 de aceite usado de motor (1356 mg). Comparando los valores de las dos primeras filas, se puede observar que el escurrimiento únicamente de agua destilada apenas afecta a la resistencia al desgaste de las mezclas bituminosas porosas. Mientras, el escurrimiento de agua destilada con aceite usado de motor hace aumentar la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas fabricadas con betunes B 60/70 y BAC, pero no a las fabricadas con betún BM-3b, las cuales permanecen con valores prácticamente del mismo orden.

Tabla IV-20. Promedios de desgaste en el ensayo cántabro de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún ensayadas en seco y con la metodología de escurrimiento con vertidos de Nivel 0 y Nivel 3 de aceite usado de motor.

Metodología de ensayo	Desgaste (%) para cada tipo de betún.		
	B 60/70	BM-3b	BAC
Seco (sin vertido de agua ni de hidrocarburo)	21,1%	9,6%	20,0%
Escurrecimiento con Nivel 0 de vertido (sólo agua)	18,9%	11,0%	21,8%
Escurrecimiento con Nivel 3 de vertido de aceite usado	25,2%	11,2%	26,9%

IV.4.2 ENSAYOS DE SEMI-INMERSIÓN

Para la comparación del efecto del vertido de aceite, gasolina y gasoil se empleó el ensayo de semi-inmersión en agua con hidrocarburo. La Figura IV-45 presenta los promedios de los desgastes obtenidos del ensayo a semi-inmersión con Nivel 3 de cada tipo de vertido sobre las mezclas bituminosas porosas fabricadas con los tres tipos de betún estudiados: B 60/70, BM-3b y BAC.

En la Figura IV-45, se observa como para todos los betunes el mayor efecto negativo lo provoca el vertido de gasoil. El segundo efecto más negativo se debe a los vertidos de aceite, para los betunes B 60/70 y BAC. Sin embargo, para el betún modificado BM-3b, el segundo efecto más importante es debido a la gasolina. Por último, la menor pérdida de resistencia la muestran los betunes B 60/70 y BAC ante el vertido de gasolina, con valores muy similares a los correspondientes a la acción únicamente del agua destilada. Mientras, el BM-3b resiste mejor los vertidos de aceite usado de motor, probablemente debido a la menor afección de este líquido viscoso sobre la estructura reforzada con polímeros de este betún.

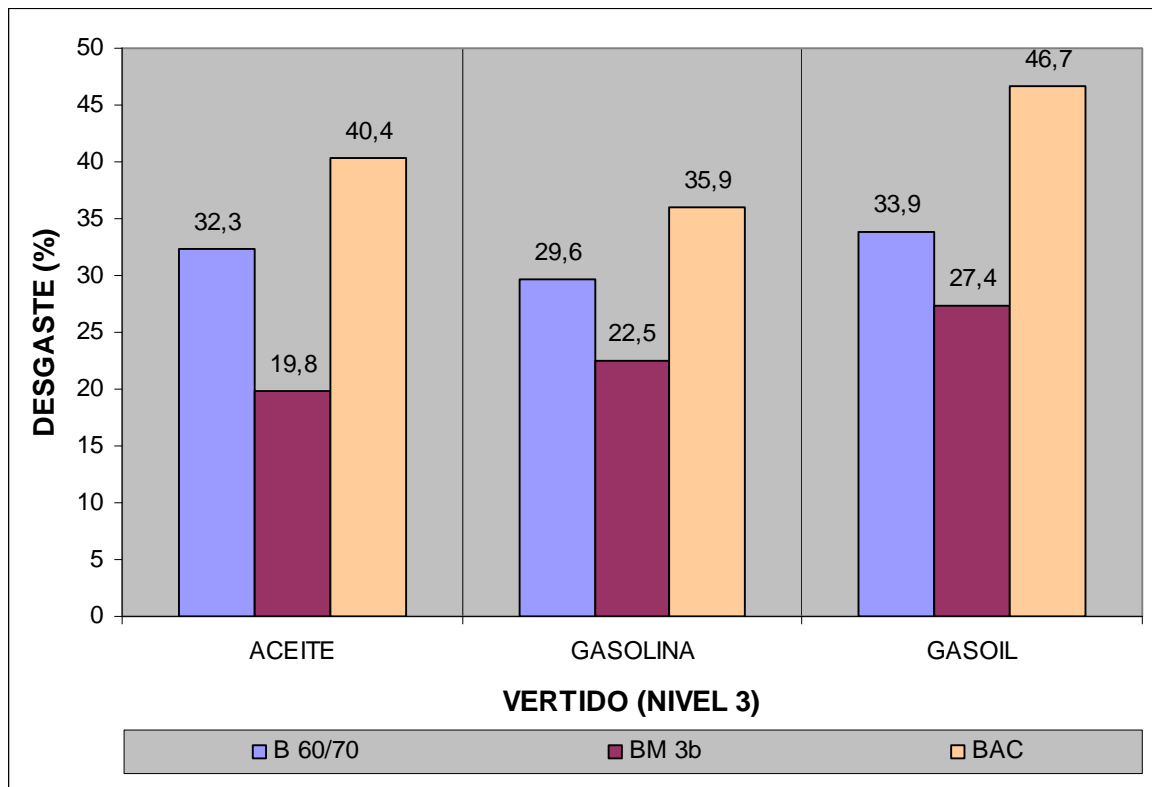


Figura IV-45. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún sometidas a semi-inmersión con un Nivel 3 de vertido de cada tipo de hidrocarburo.

Posteriormente se ensayó una serie más de probetas fabricadas con betún BM-3b, y sometidas a vertidos de Nivel 4, obteniéndose los resultados que se muestran en la Figura IV-46. Comparando los resultados obtenidos con el betún BM-3b bajo solicitudes de Nivel 3 y Nivel 4 (Figura IV-45 y Figura IV-46), se observa que el comportamiento es prácticamente el mismo. Así, con el vertido de hidrocarburos de Nivel 4 se confirma mayor afección debida al vertido de gasoil, mientras que se equiparan las afecciones debidas a la semi-inmersión en agua, aceite y gasolina.

A continuación, suponiendo la mayor resistencia del betún anticarburante BAC, se ensayó a semi-inmersión una serie más de probetas fabricadas con este tipo de betún, sometiéndolas a un vertido de Nivel 5 de cada uno de los tres tipos de hidrocarburos. Los promedios obtenidos quedan recogidos en la Figura IV-47. Comparando los resultados obtenidos con el betún BAC bajo solicitudes de Nivel 3 y Nivel 5 (Figura IV-45 y Figura IV-47), se observa que las afecciones debidas a la gasolina y al gasoil se mantienen prácticamente iguales. Sin embargo, las afecciones debidas al aceite usado de motor disminuyen sustancialmente.

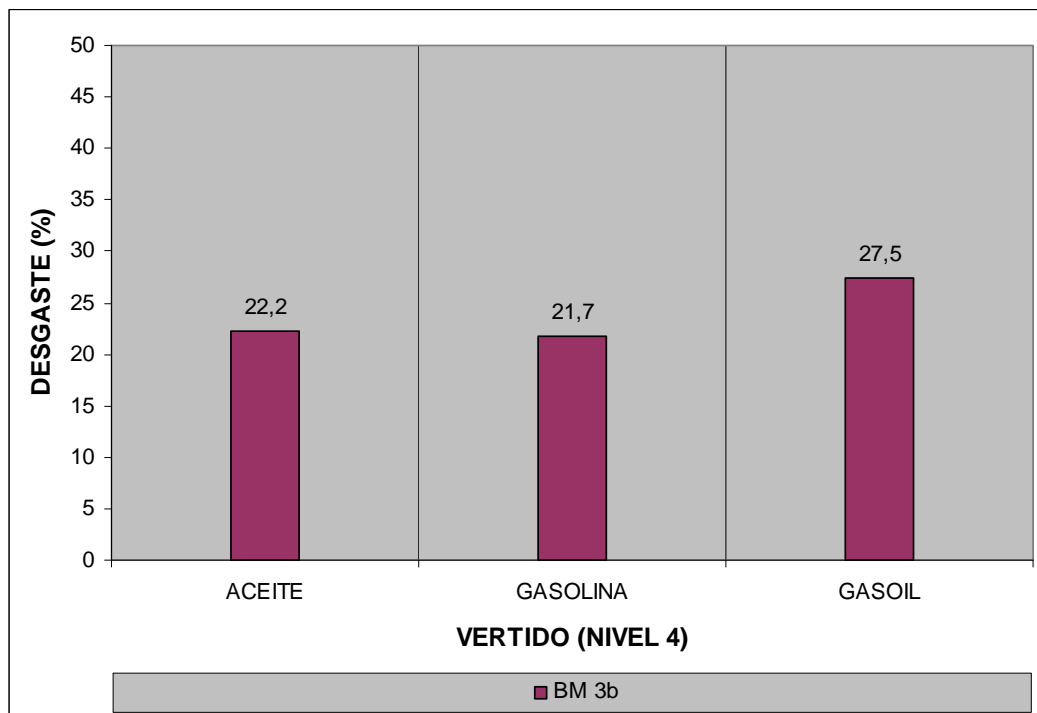


Figura IV-46. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con el betún BM-3b sometidas a semi-inmersión con un Nivel 4 de vertido de cada tipo de hidrocarburo.

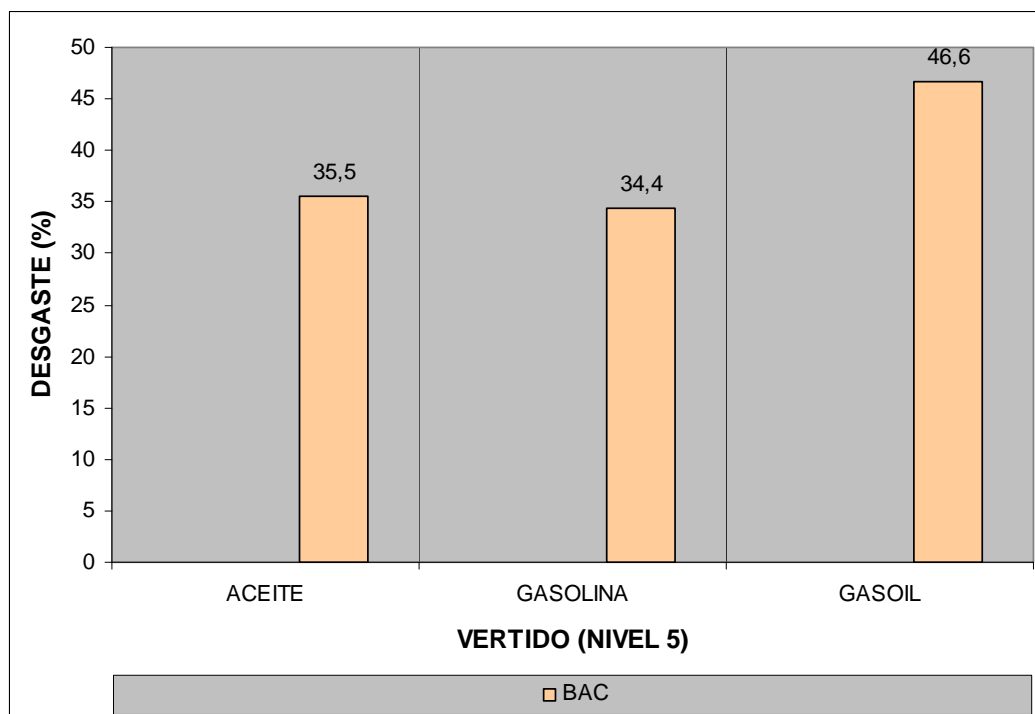


Figura IV-47. Promedios de los desgastes obtenidos del ensayo cántabro de las probetas mezcla bituminosa porosa fabricadas con el betún BAC sometidas a semi-inmersión con un Nivel 5 de vertido de cada tipo de hidrocarburo.

La Tabla IV-21 presenta los promedios de los resultados de desgaste correspondientes a las probetas control, sin vertido de agua ni hidrocarburo, además de los promedios correspondientes a las probetas ensayadas a semi-inmersión con vertidos de Nivel 0 (sólo agua destilada) y Nivel 3 de aceite usado de motor.

Observando los valores recogidos en la Tabla IV-21, se puede llegar a explicar la disminución de la afección del aceite usado en el caso de la mezcla fabricada con el betún BAC. De partida, la afección de la semi-inmersión en agua destilada a la mezcla fabricada con betún BAC supone un desgaste del 38%. Así, es posible que al aumentar el nivel de vertido de aceite usado de motor, o incluso de gasolina, la afección del agua destilada sobre la mezcla disminuya. Esto supondría un efecto beneficioso de la película de hidrocarburo sobre la mezcla que evitaría el contacto directo del betún con el agua destilada durante el periodo de semi-inmersión. Además, este razonamiento podría explicar por qué los valores de desgaste del betún BM-3b con vertido de Nivel 3 y Nivel 4 son también inferiores al valor de 23,6% correspondiente al Nivel 0. En cualquier caso, serían necesarias nuevas series de ensayos a semi-inmersión para confirmar esta suposición referida a los betunes modificados BM-3b y BAC, según la cual el agua destilada atacaría a estas mezclas bituminosas porosas más que el aceite usado de motor.

Tabla IV-21. Promedios de desgaste en el ensayo cántabro de las probetas de mezcla bituminosa porosa fabricadas con cada tipo de betún ensayadas en seco y con la metodología de semi-inmersión con vertidos de Nivel 0 y Nivel 3 de aceite usado de motor.

Metodología de ensayo	Desgaste (%) para cada tipo de betún.		
	B 60/70	BM-3b	BAC
Seco (sin vertido de agua ni de hidrocarburo)	21,1%	9,6%	20,0%
Semi-inmersión con Nivel 0	28,5%	23,6%	38,0%
Semi-inmersión con Nivel 3 de vertido de aceite usado.	32,3%	19,8%	40,4%

Por último, comparando los resultados recogidos en la Tabla IV-20 y la Tabla IV-21, se comprueba la mayor agresividad del ensayo de semi-inmersión en agua destilada con hidrocarburos, fundamentalmente debida a la acción del agua destilada. Además, se constata la mejor resistencia de las mezclas bituminosas porosas fabricadas con betún BM-3b al vertido de aceite usado de motor. En resumen, el betún BM-3b es el más indicado de los tres ensayados para fabricar este tipo de mezclas y mantener desgastes inferiores al 30% frente a vertidos de hasta 1900 mg de aceite, gasolina o gasoil.

IV.4.3 CONCLUSIONES PARCIALES

Del análisis de la resistencia al vertido de hidrocarburos de mezclas bituminosas porosas fabricadas con betunes B 60/70, BM-3b y BAC al 4,5%, se extrajeron las siguientes conclusiones parciales:

- Las metodologías propuestas, de escurrimiento y de semi-inmersión, permiten caracterizar el efecto de los vertidos de hidrocarburos sobre las mezclas bituminosas porosas fabricadas con distintos tipos de betunes.
- Con la metodología de escurrimiento de agua destilada con aceite de motor, al mismo nivel de vertido, la mezcla bituminosa fabricada con betún B 60/70 sufre una pérdida de resistencia al desgaste menor que la fabricada con betún anticarburante BAC, mientras que la fabricada con betún modificado BM-3b no sufre afección alguna.
- Según la metodología de escurrimiento, el uso del betún anticarburante BAC está justificado en zonas donde se esperan vertidos de aceite usado de motor superiores a 1356 mg, con el objetivo de mantener niveles de desgaste en torno al 25%.
- Con la metodología de semi-inmersión, el agua destilada sin hidrocarburos afecta de manera importante a las mezclas bituminosas porosas, causando una pérdida por desgaste en el ensayo cántabro de hasta el 38,0% en el caso de mezclas fabricadas con el betún anticarburante BAC.
- Con la metodología de semi-inmersión en agua destilada con hidrocarburos, el vertido de gasoil es el más agresivo, seguido del de aceite usado de motor, siendo el menos agresivo el vertido de gasolina, salvo en el caso del betún modificado BM-3b, afectado más por la gasolina que por el aceite.
- Con la metodología de semi-inmersión, al aumentar el nivel de vertido de aceite o de gasolina disminuye la acción perjudicial del agua destilada sobre las mezclas bituminosas porosas fabricadas con betunes modificados BM-3b y BAC, probablemente debido a que la película de hidrocarburos ataca menos a este tipo de betunes que el contacto directo con el agua destilada.
- Según la metodología de semi-inmersión, el betún más adecuado para fabricar mezclas bituminosas porosas con una alta resistencia a los derrames de hidrocarburos es el betún modificado BM-3b, asegurando desgastes por debajo del 25% para vertidos de hasta 1900 mg de aceite o gasolina, y por debajo del 30% para vertidos de hasta 1900 mg de gasoil.

IV.5 FUNCIONALIDAD DE FIRMES PERMEABLES

Se presentan a continuación los resultados y discusión de la primera fase de la investigación sobre la funcionalidad de los firmes permeables. En esta fase se han realizado mediciones de la reacción y respuesta de los modelos de firmes permeables construidos en el Laboratorio, en el Campus y en Gijón, sin carga alguna de sedimento. Se han ensayado cuatro tipos de secciones permeables:

- BR: pavimento permeable de adoquines con ranuras con subbase de árido reciclado de construcción.
- PR: pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa con base y subbase de árido reciclado de construcción.
- PA: pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa con base y subbase de árido calizo de cantera.
- BA: pavimento permeable de adoquines con ranuras con subbase de árido calizo de cantera.

El tiempo de reacción es aquel que transcurre desde que comienza la aportación de agua sobre el pavimento permeable, hasta que se inicia el flujo efluente. Mientras, la respuesta del firme permeable la constituye el volumen efluente acumulado a lo largo del tiempo. En el *Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables*, se presenta un resumen más amplio de los resultados obtenidos en esta parte de la investigación.

IV.5.1 MODELOS DEL LABORATORIO

En la Figura IV-48 se presentan la evolución a lo largo del tiempo de la reacción de cada uno de los cuatro tipos de sección permeable ensayados en el Laboratorio FIDICA. Estos tiempos de reacción corresponden a aportaciones de agua en forma de aguaceros simulados de una hora de duración y 50 mm/h de intensidad, cuyo periodo de retorno es de cien años en Santander. El valor de cada punto se ha obtenido como promedio de las cuatro réplicas de cada sección de firme permeable estudiada. Los valores altos del tiempo suponen reacciones lentas del firme permeable con un mayor grado de laminación que los valores bajos de tiempo, asociados con reacciones rápidas del firme permeable ante la aportación de agua.

Analizando las tendencias de los valores del tiempo de reacción con el paso de las semanas (Figura IV-48), se observa como inicialmente las reacciones más rápidas corresponden a las secciones con áridos calizos de cantera (PA y BA). Esta tendencia probablemente se deba a la mayor limpieza y menor capacidad de absorción de estos áridos en comparación con los reciclados de construcción. Sin embargo, con el paso de las semanas y de

las simulaciones de lluvia, se observa como la influencia del tipo de árido en el tiempo de reacción pierde importancia y gana protagonismo la influencia del tipo de pavimento. Así, a partir de la semana cincuenta desde la construcción, las reacciones más lentas corresponden a las superficies de mezcla bituminosa porosa, y las más rápidas a los pavimentos de adoquines con ranuras. Esta influencia del tipo de superficie en el grado de laminación ofrecido por el firme permeable puede ser debida a las diferencias en el tiempo de infiltración a través de los pavimentos permeables. Este tiempo de infiltración es ligeramente menor en el caso de la mezcla bituminosa porosa, debido al menor tamaño de los huecos y la mayor tortuosidad de los caminos de infiltración. Mientras que en el pavimento de adoquines, las ranuras no retardan el paso del agua hacia las capas inferiores. Ambos pavimentos sin ningún problema de colmatación. En resumen, el mayor tiempo de reacción a lo largo del tiempo lo ofrece la sección de mezcla bituminosa porosa con capas granulares de áridos reciclados (PR).

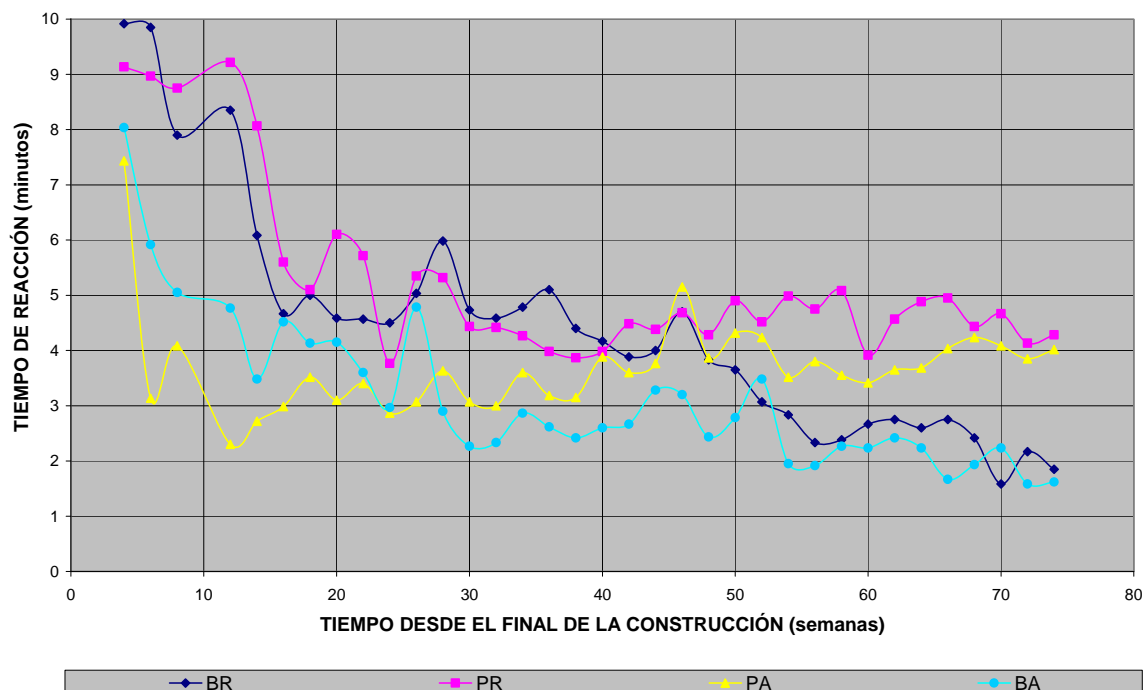


Figura IV-48. Evolución a lo largo del tiempo de los promedios de los tiempos de reacción de cada sección tipo de firme permeable del Laboratorio.

Respecto a las mediciones de la respuesta de los firmes permeables a las aportaciones de agua simuladas en el Laboratorio FIDICA, las cuatro figuras siguientes (Figura IV-49, Figura IV-50, Figura IV-51 y Figura IV-52) presentan el porcentaje infiltrado a lo largo del tiempo, respecto al volumen de agua aportado, para las cuatro secciones tipo estudiadas: BR, PR, PA y BA.

La Figura IV-49, correspondiente a la sección tipo BR, y la Figura IV-52, correspondiente a la sección tipo BA, recogen un total de veintisiete series de datos. Mientras, la Figura IV-50, correspondiente a la sección tipo PR, y la Figura IV-51, correspondiente a la sección tipo PA, recogen un total de treinta y seis series de datos. A pesar de haberse medido en diferentes momentos, todas las series de cada tipo de sección se han representado juntas para identificar las características propias de la correspondiente tipología de firme permeable. Por tanto, con la intención de identificar estas características intrínsecas de cada sección, no se consideran los efectos debidos al tiempo transcurrido desde la construcción. Tan sólo comentar que la mayor parte de las series situadas en la parte inferior de la curva de tendencia corresponden a las primeras simulaciones de lluvia, mientras que la mayoría de las series situadas en la parte superior se obtuvieron con las últimas simulaciones.

A la vista de las gráficas, se observa una fuerte dispersión en las secciones con pavimento permeable de adoquines con ranuras, tipos BR y BA (Figura IV-49 y Figura IV-52), y un comportamiento más estable de los firmes permeables con pavimento de mezcla bituminosa porosa, tipos PR y PA (Figura IV-50 y Figura IV-51). Si bien parte de la dispersión se debe a la variabilidad de la simulación de lluvia, la componente más importante se puede asociar a los diferentes procesos de infiltración que tienen lugar con ambas superficies. Así, mientras los pavimentos permeables de adoquines con ranuras ofrecen múltiples caminos de infiltración a través de las ranuras libres, los huecos interconectados de la mezcla bituminosa porosa marcan un número limitado de posibles rutas de infiltración. Por tanto, en un pavimento de adoquines el flujo de agua debe abrir a menudo un nuevo camino en las capas inferiores, mientras que en un pavimento de mezcla bituminosa porosa el agua llega a las capas inferiores prácticamente siempre a través de los mismos puntos. En resumen, los adoquines ofrecen un mayor número de rutas de infiltración a través de pavimento permeable que la mezcla bituminosa porosa, pudiendo explicar parte de la variabilidad de sus respuestas.

Por otra parte, comparando los materiales de las capas inferiores, las secciones con subbase de material reciclado, tipos BR y PR (Figura IV-49 y Figura IV-50), se diferencian de las que tienen subbase de árido calizo, tipos BA y PA (Figura IV-52 y Figura IV-51), fundamentalmente en las pendientes de infiltración durante la primera media hora después de la simulación de lluvia. Así, las secciones construidas con áridos reciclados de construcción infiltran en este tiempo de un 10% a un 15% menos que las construidas con áridos calizos de cantera. Este comportamiento se puede explicar atendiendo a la mayor capacidad de absorción de agua de los áridos reciclados, así como a su mayor contenido en finos. Este mayor contenido de finos se puede comprobar comparando la granulometría recogida en la Figura III-34 con la recogida en la Figura III-35, respecto al Laboratorio FIDICA.

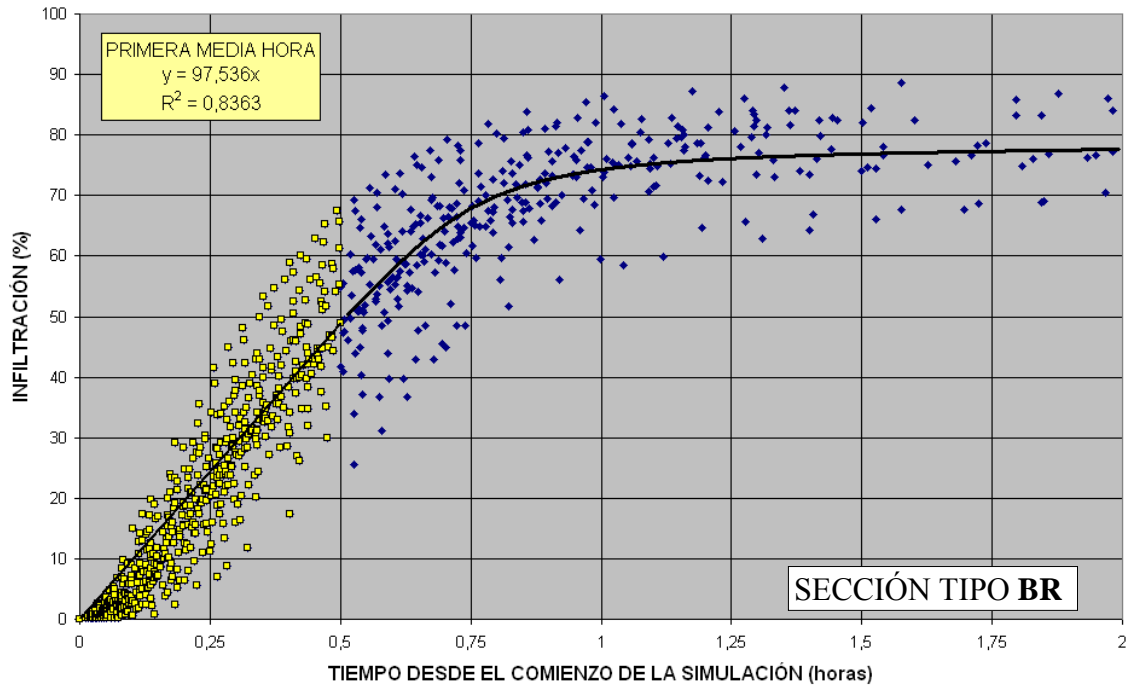


Figura IV-49. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BR del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.

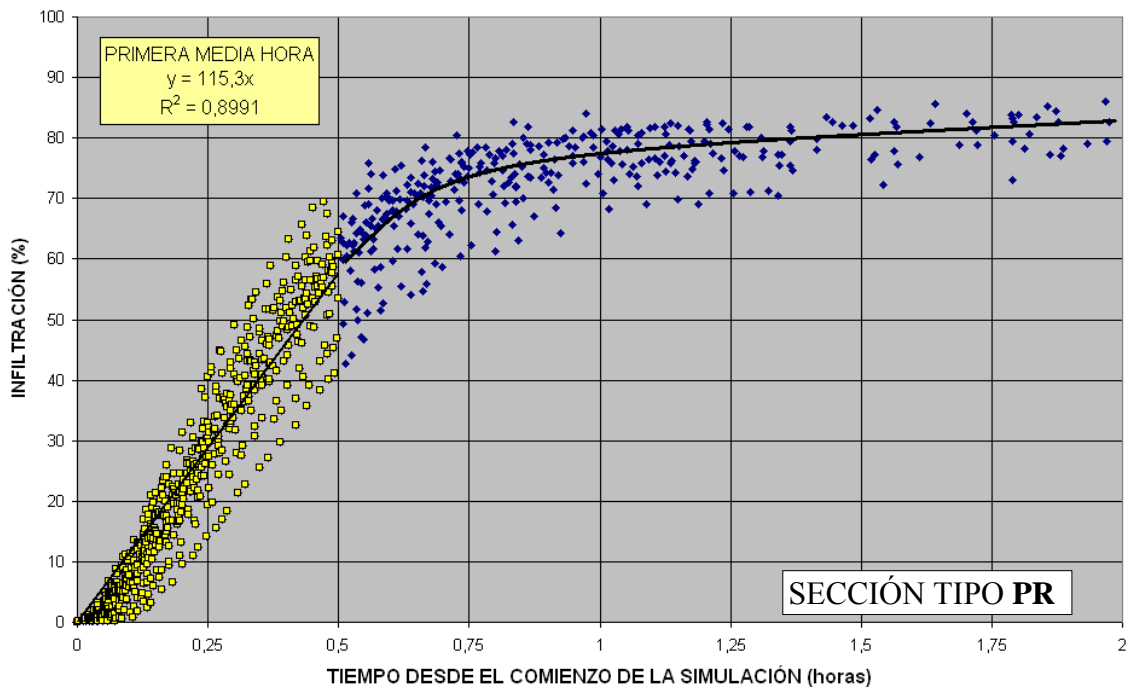


Figura IV-50. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.

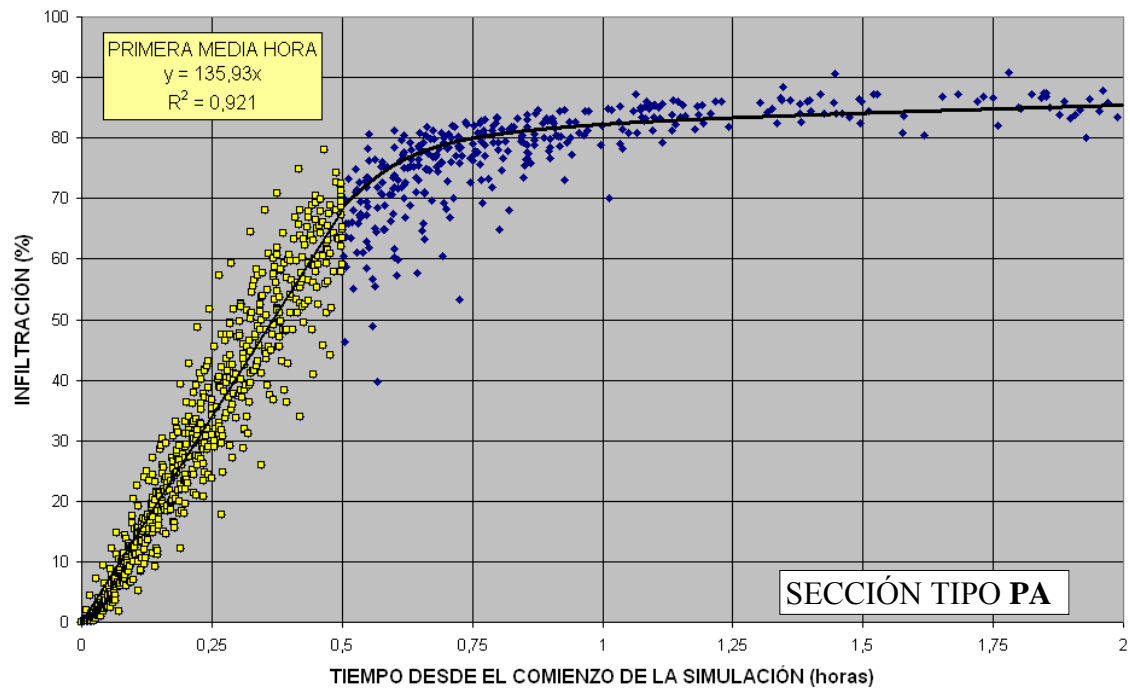


Figura IV-51. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PA del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.

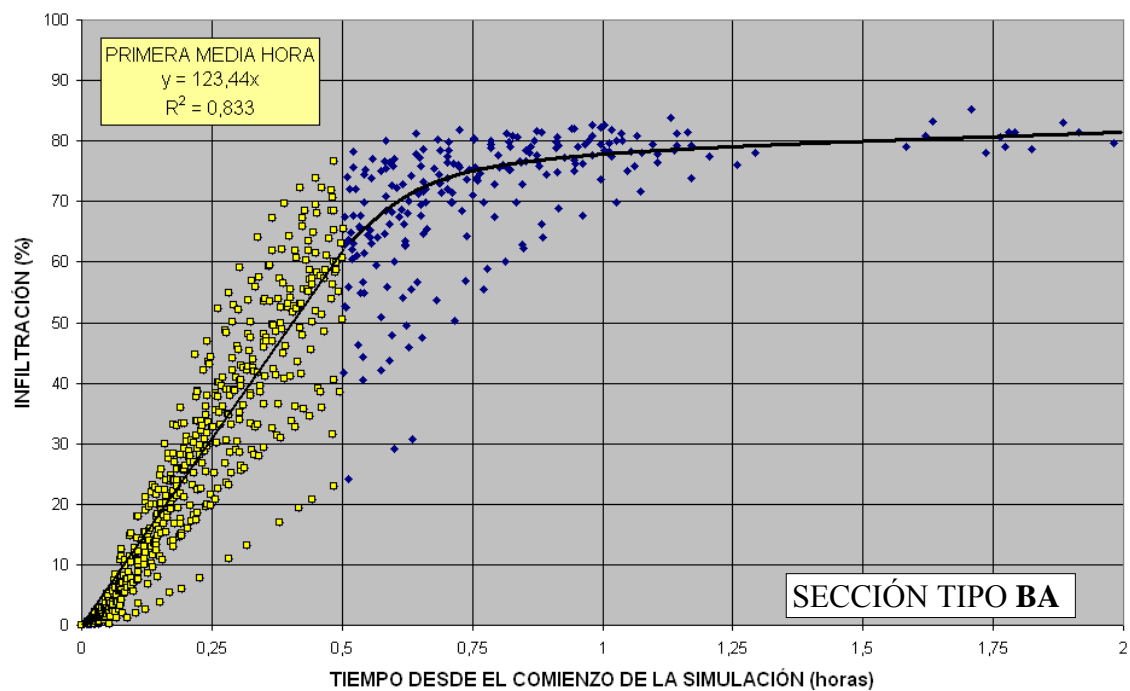


Figura IV-52. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA del Laboratorio expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a la simulación de lluvia.

Por último, la Figura IV-53 muestra los gráficos del porcentaje de infiltración al cabo de cuarenta y ocho horas de la simulación de lluvia. En esta figura se puede observar como las secciones construidas con áridos reciclados, tipos BR y PR, presentan valores más bajos al inicio del periodo de simulación que confirman la mayor capacidad de retención del agua aportada por parte del árido reciclado. Sin embargo, al igual que se observaba en el análisis del tiempo de reacción, con el paso de las semanas la influencia del tipo de árido pierde importancia frente a la influencia del tipo de superficie permeable. Así, los firmes permeables con superficie de mezcla bituminosa porosa, ofrecen una reacción más lenta y una respuesta más pausada que los firmes permeables con pavimento de adoquines con ranuras, ambos sin problemas de colmatación. Además, chequeando las diferencias entre los comportamientos de los dos tipos de superficies, se observa de nuevo una mayor dispersión de los resultados de infiltración al cabo de cuarenta y ocho horas en el caso de los bloques de hormigón. Esta variabilidad puede explicarse de nuevo por la influencia de la discontinuidad de la superficie la cual puede provocar diferentes cauces de percolación para cada simulación de lluvia.

Con todo, los promedios de la infiltración al cabo de cuarenta y ocho horas de los treinta y seis valores medidos de las cuatro secciones ensayadas a lo largo de las setenta y cuatro semanas de ensayo son: 88,5% para la sección BR, 87,1% para la PR, 89,5% para la PA y 89,3% para la BA; siendo ligeramente la más baja la infiltración de la sección PR.

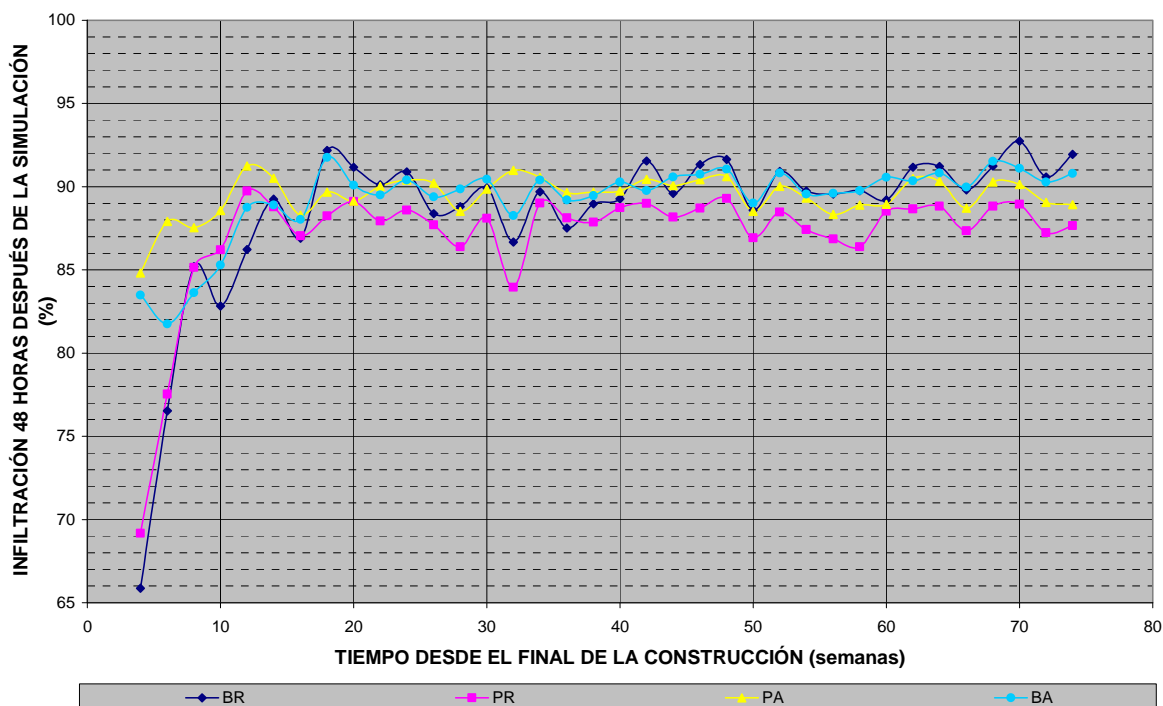


Figura IV-53. Evolución a lo largo del tiempo de los promedios de los porcentajes de infiltración al cabo de 48 horas de la simulación de lluvia para cada sección tipo de firme permeable del Laboratorio.

IV.5.2 *MODELOS DEL CAMPUS*

En los modelos del Campus se comprobaron los resultados obtenidos en el Laboratorio. Así, respecto al tiempo de reacción, los valores obtenidos en los modelos construidos en el Campus de la Universidad de Cantabria fueron: 2:50 minutos para la sección tipo BR, 8:10 minutos para la tipo PR, 2:40 minutos para la PA y 2:00 minutos para la BA. Por tanto, respecto al tiempo de reacción, destaca únicamente la sección PR, ofreciendo una laminación aproximadamente cuatro veces mayor que los modelos con pavimento de adoquines.

Por su parte, la Figura IV-54 presenta los resultados de la respuesta de los cuatro firmes permeables expresados en porcentajes de volumen infiltrado con el tiempo. En esta figura se puede observar como la sección tipo PR confirma claramente su mayor laminación, probablemente gracias a la mayor retención del agua por parte de los áridos reciclados. Mientras, la sección PA, con pavimento de mezcla bituminosa porosa, ofrece una respuesta inicial pausada, igualando posteriormente los porcentajes correspondientes a las secciones de adoquines con ranuras, tipos BR y BA, las cuales presentan prácticamente la misma respuesta. Por tanto, se confirman los resultados obtenidos en el Laboratorio, siendo los firmes permeables con pavimento de aglomerado poroso y capas granulares de árido reciclado los que ofrecen una mayor laminación de las precipitaciones.

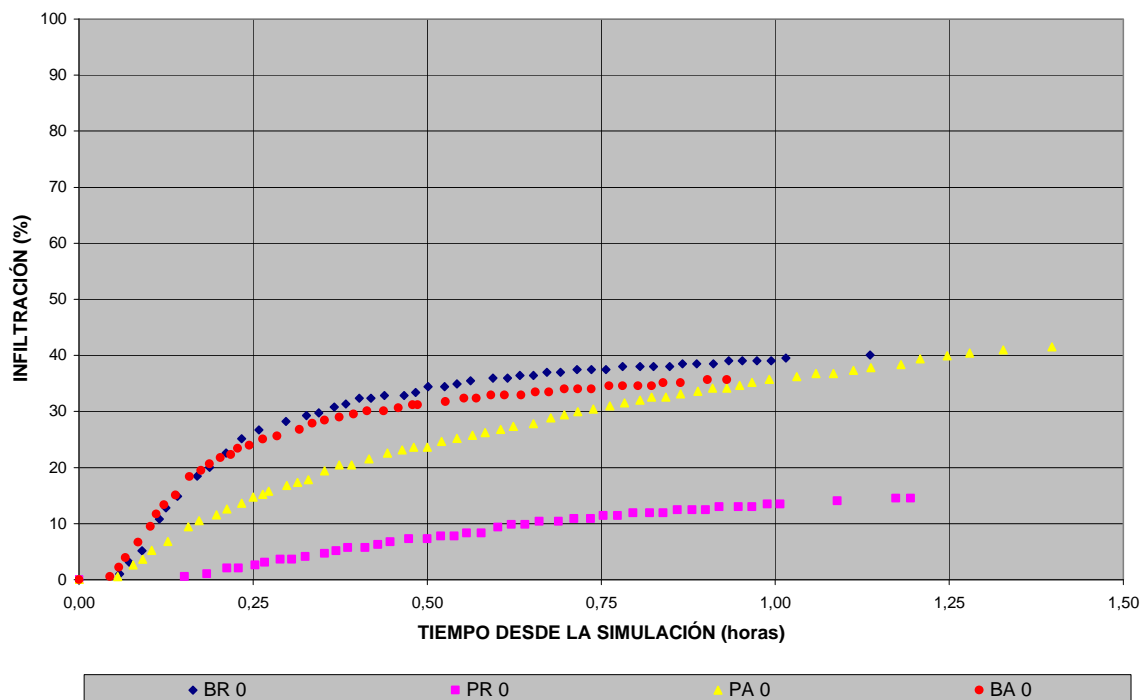


Figura IV-54. Respuesta de cada sección tipo de firme permeable del Campus expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de la hora y media posterior a la simulación de lluvia.

IV.5.3 MODELOS DE GIJÓN

En el aparcamiento de la Guía, en Gijón, los ensayos de funcionalidad de firmes permeables sobre las plazas experimentales construidas con los cuatro tipos de secciones sirvieron fundamentalmente para identificar los problemas asociados a la construcción y monitorización de este tipo de secciones en aplicaciones reales.

Las primeras mediciones del agua infiltrada a través de las secciones permeables construidas en Gijón permitieron descartar varias plazas experimentales desde el punto de vista del análisis de su funcionalidad. Así, no han sido consideradas aquellas plazas en las que el volumen de efluente recogido en la correspondiente arqueta de control fuese menor que el de sus semejantes o nulo. Estas diferencias de comportamiento entre secciones del mismo tipo son principalmente debidas a problemas de impermeabilización en el fondo de las plazas. Por tanto, la falta de supervisión durante la construcción ha imposibilitado el análisis estadístico de las tres réplicas de cada sección. Si embargo, la existencia de estas tres réplicas ha permitido la selección de la plaza con mejor acabado de cada tres. De este modo se seleccionaron las cuatro plazas siguientes en representación de los cuatro tipos de sección permeable objeto de ensayo:

- Plaza 6: sección tipo BR (bloques de hormigón y áridos reciclados).
- Plaza 8: sección tipo BA (bloques de hormigón y áridos calizos).
- Plaza 12: sección tipo PA (aglomerado poroso y áridos calizos).
- Plaza 14: sección tipo PR (aglomerado poroso y áridos reciclados).

Además, desde un principio se descartó el estudio de la funcionalidad de las tres plazas experimentales con sección de césped reforzado, debido a no contar con experiencias de dicha sección en el Laboratorio y a sus características que ponen en duda su inclusión en la definición de firme permeable. Estas características son una escasa infiltración superficial, debida al terreno arcilloso utilizado como sustrato para el césped, y una excesiva retención del agua en el interior en el interior del firme, asociada a la granulometría continua de las capas inferiores de dicha sección.

Respecto a las cuatro plazas estudiadas, en primer lugar se presentan los resultados de funcionalidad asociados a las aportaciones de agua naturales. Para el análisis de la reacción y respuesta de las secciones permeables ensayadas frente a las precipitaciones naturales se cuenta con los datos horarios de precipitación y temperatura de la Agencia Estatal de Meteorología (autorización 390050781) y con un pluviómetro con registro de datos cada cinco minutos del volumen efluente de la plaza ensayada. Por tanto, el tiempo de reacción entre el comienzo del aguacero y el comienzo del caudal efluente tan sólo puede ser aproximado al

orden de las horas, marcado por los datos meteorológicos disponibles. Por otra parte, tan sólo se consideraron los aguaceros que llegaron a producir un caudal efluente de agua infiltrada a través de la sección completa de firme permeable de duración mayor de una hora. Además, señalar que las series de datos recogidas con el pluviómetro situado bajo la tubería efluente presentan escalas de tiempo y de volumen variables. La escala de tiempo se ajusta a la duración de la respuesta en cada caso, desde el primer dato hasta el último distinto de cero. Mientras, los volúmenes efluentes son los directamente medidos al representar porcentajes muy bajos de las precipitaciones registradas.

La plaza 6, sección tipo BR, fue monitorizada del 4 al 12 de agosto de 2006. Durante este tiempo se logró registrar una única serie de efluente (Figura IV-55). La duración de esta única serie fue de 8 horas y se puede asociar a un aguacero que había finalizado 71 horas antes, con una precipitación total de 10,8 litros por metro cuadrado en 10 horas. Esto supone un tiempo de reacción de aproximadamente 80 horas y un volumen efluente correspondiente al 0,5% del agua de lluvia precipitada en la plaza de aparcamiento de 12,5 m². La lluvia acumulada en los 10 días anteriores a la serie medida era de 13,3 mm y la temperatura media de 21,0 °C. La baja precipitación, la elevada temperatura y la presencia de materiales reciclados en la subbase pueden explicar la absorción y laminación de gran parte del agua.

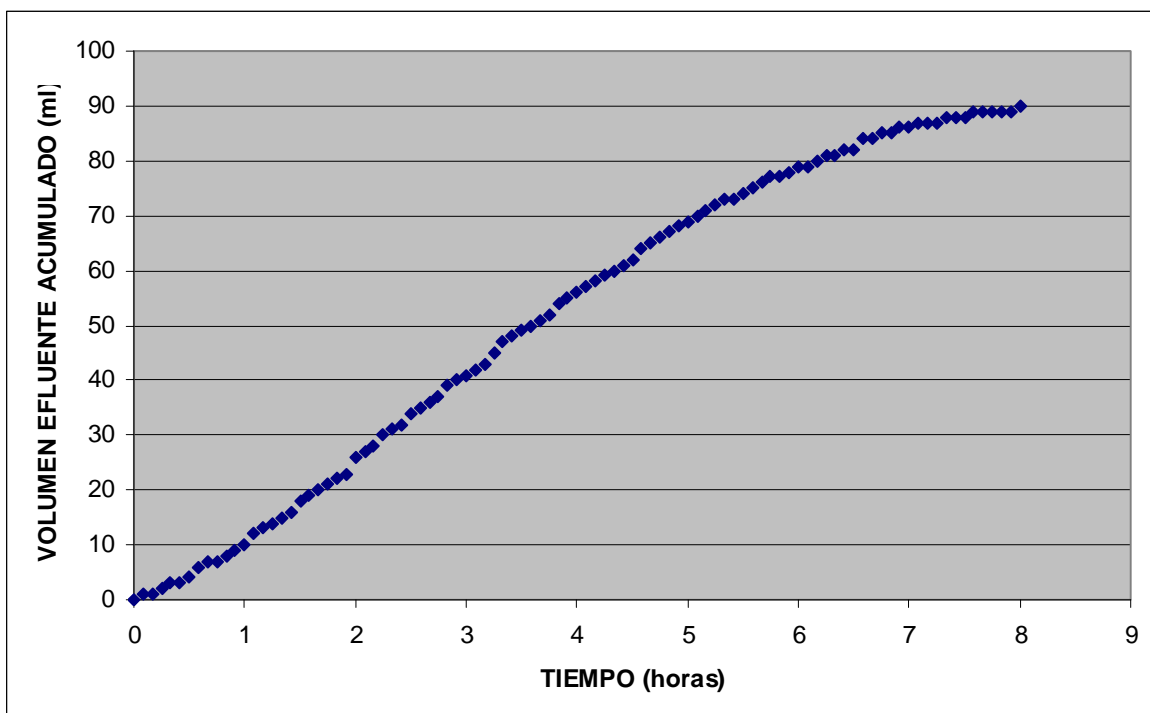


Figura IV-55. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BR de Gijón (plaza 6) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/1).

La plaza 8, sección tipo BA, fue monitorizada del 29 de marzo al 16 de mayo de 2007. Durante este tiempo se lograron monitorizar tres series de efluente. La duración de la primera serie (Figura IV-56) fue de 42 horas. Dado que el caudal efluente ya había comenzado cuando se colocó el pluviómetro, no es posible identificar claramente el aguacero causante del efluente, ni por tanto el correspondiente tiempo de reacción. La precipitación total en los 10 días anteriores fue de 36,5 mm y la temperatura media de 9,6 °C. En esta serie se registró un aumento del caudal efluente a partir de la hora 36, debido a un aguacero de duración 11 horas y precipitación total de 8,6 litros por metro cuadrado. El tiempo de reacción para esta respuesta es de 10 horas y el volumen efluente a partir de entonces supone un 45,2% del volumen precipitado sobre la plaza. Porcentaje alto debido al estado saturado del firme.

La segunda serie de la plaza 8 tiene una duración de 144 horas y se presenta en Figura IV-57. Esta serie está separada de la primera por 108 horas sin efluente y se corresponde con un aguacero de 24,1 litros por metro cuadrado en 15 horas. El tiempo de reacción es de aproximadamente 102 horas. Esta serie se vió interrumpida al terminarse la batería que alimenta los equipos, momento en el que el porcentaje infiltrado era del 5,7%. La respuesta recogida en esta segunda serie representa la reacción diferida a una precipitación. Mientras, en la tercera serie de esta plaza (Figura IV-58), se repite la respuesta observada en la primera serie, con una reacción rápida debida a un aguacero ocurrido durante el tiempo de medición, sobre una reacción diferida, en esta ocasión con un caudal base menor.

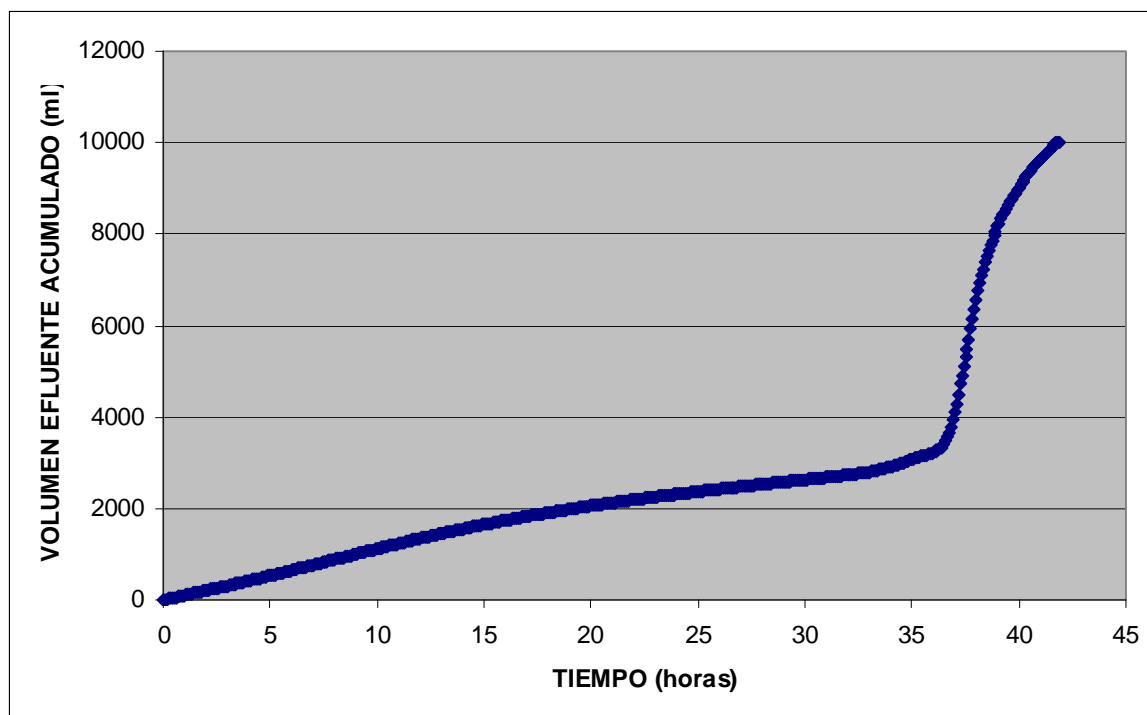


Figura IV-56. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/3).

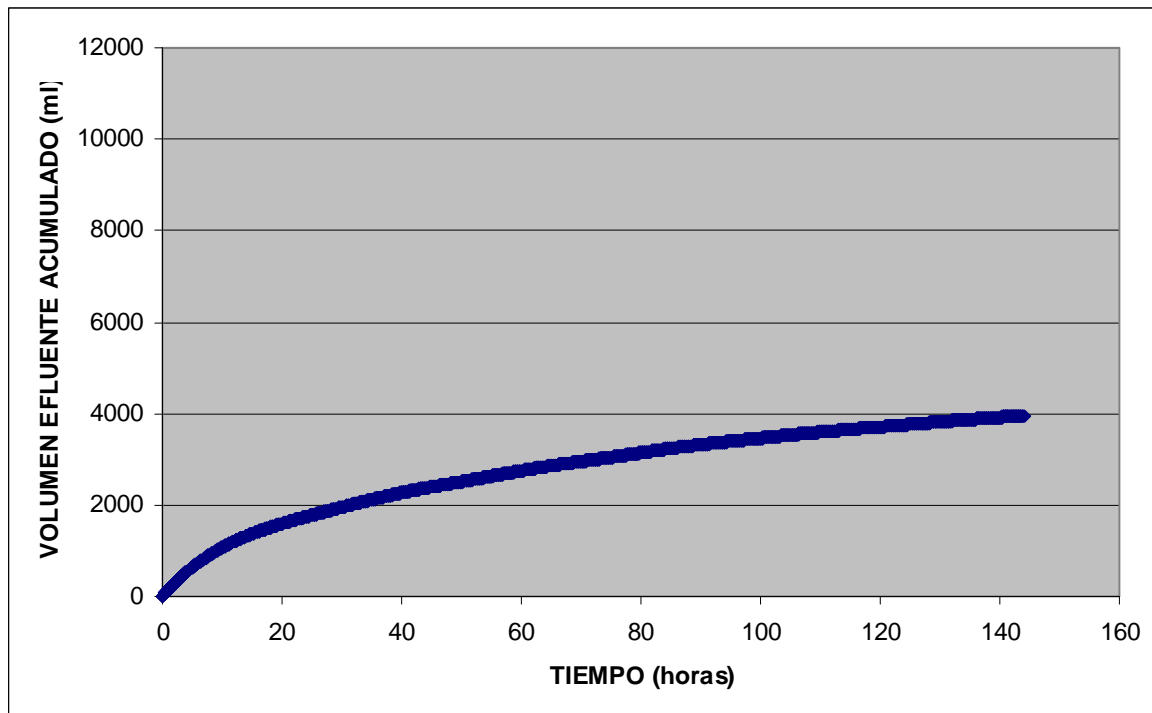


Figura IV-57. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 2/3).

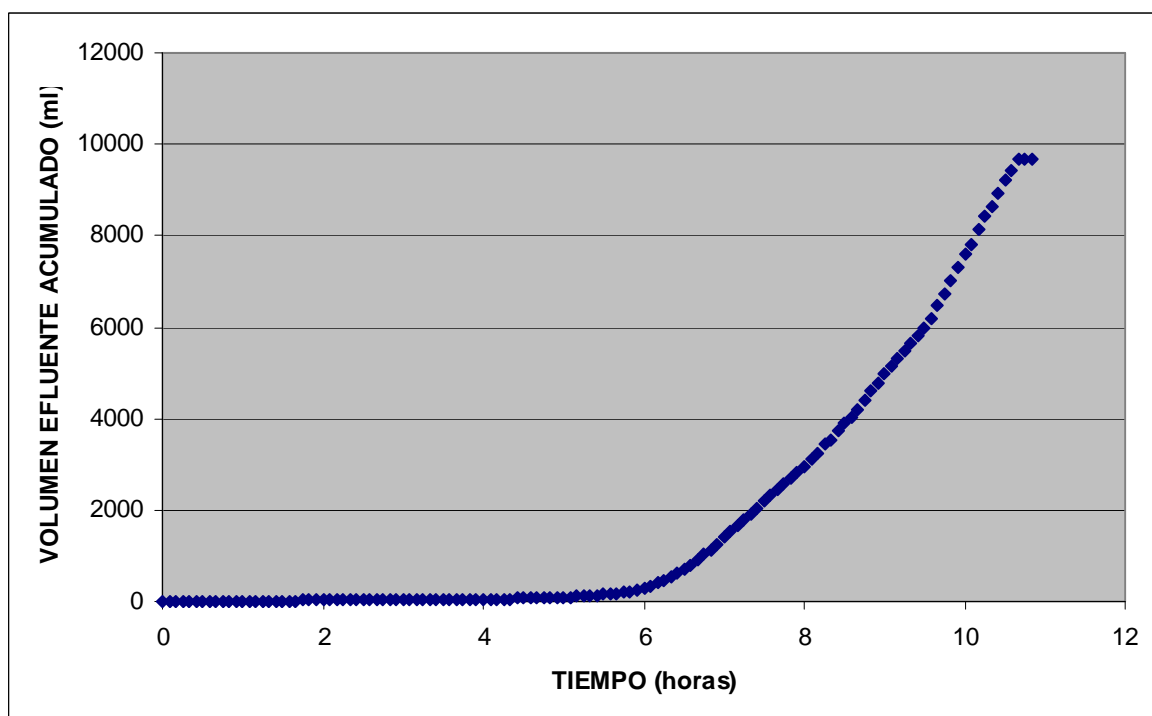


Figura IV-58. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 3/3).

La plaza 12, sección tipo PA, fue monitorizada del 11 al 18 de septiembre de 2006. Durante este tiempo se lograron registrar tres respuestas del efluente, las cuales, dada su corta duración se agruparon en una única serie de 29 horas de duración (Figura IV-59). La lluvia acumulada en los 10 días anteriores era de 6,1 mm y la temperatura media de 21,4 °C.

Los tres escalones representados en la Figura IV-59 se pueden asociar a aguaceros con precipitaciones por encima de 2 litros por metro cuadrado en una hora. Así, el primer escalón corresponde a una precipitación de 56,6 mm en 2 horas. El segundo escalón corresponde a una precipitación de 7,9 mm en 3 horas. El tercer escalón corresponde a la reacción a un aguacero de 11,0 mm por metro cuadrado en 5 horas. Los tiempos de reacción son de 1 hora, 2 horas y 4 horas, respectivamente.

Los dos primeros aguaceros están separados por 6 horas con una precipitación de 3,4 mm, y los dos últimos por 16 horas con una precipitación de 2,7 mm. A pesar de la rápida reacción y de la marcada respuesta, el porcentaje de volumen efluente acumulado respecto al total de precipitación registrada es de tan sólo el 2,7%. En este caso, el escaso porcentaje de infiltración total podría tener como causa principal la elevada temperatura del final del verano y la escasa lluvia precedente, las cuales pueden aumentar las pérdidas por evaporación y absorción de los materiales de construcción de la plaza experimental.

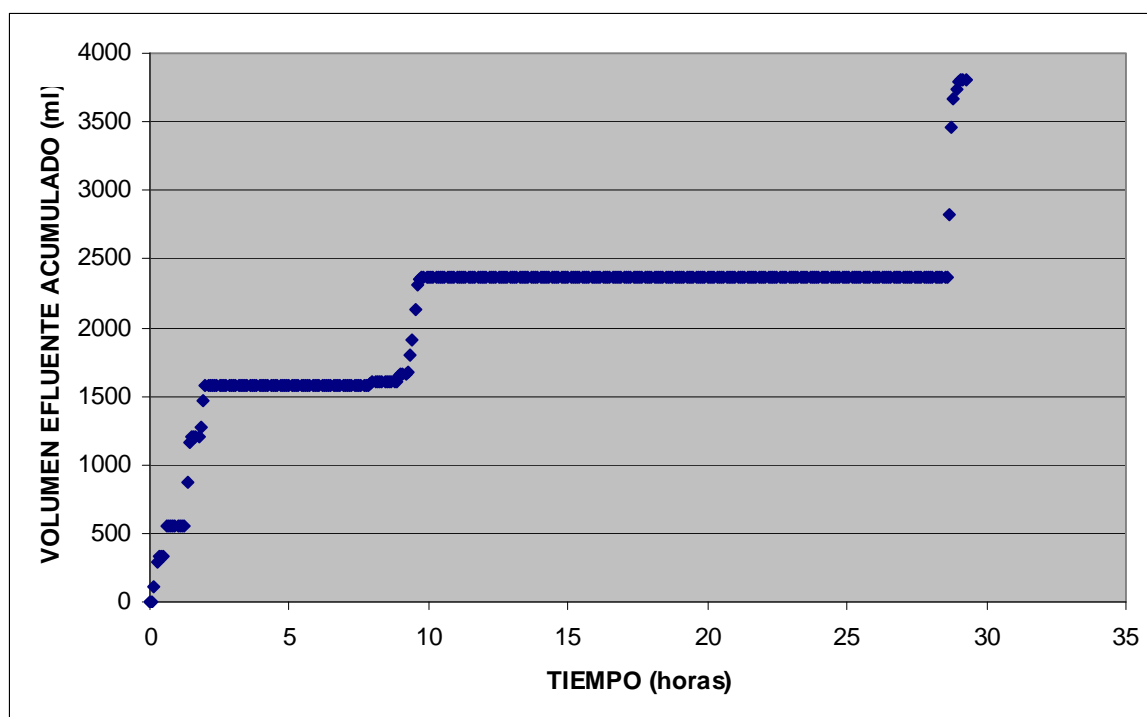


Figura IV-59. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PA de Gijón (plaza 12) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/1).

La plaza 14, sección PR, fue monitorizada del 7 al 28 de febrero de 2007, a excepción de los días 18 al 21, sin registro de datos al haberse agotado las baterías de los equipos de medición. Durante este tiempo se lograron acumular cuatro series de efluente, con una duración del orden de 6 horas cada una.

La primera serie (Figura IV-60) corresponde a un aguacero de 2 horas de duración con una precipitación de 5,4 litros por metro cuadrado. El tiempo de reacción fue de 2 horas y el porcentaje infiltrado del 12,1%. La lluvia acumulada en los 10 días anteriores al aguacero correspondiente a la primera serie era de 6,8 mm y la temperatura media de 10,5 °C. Esta primera serie es la respuesta a un aguacero corto que finaliza al comienzo del caudal efluente. Así, la serie refleja un caudal efluente base de la respuesta sobre el que se distingue la reacción al aumento de la intensidad de la precipitación durante la segunda hora del aguacero, representada por la mayor pendiente al cabo de media hora de registro.

La segunda serie monitorizada en esta plaza (Figura IV-61) corresponde a un aguacero de 4 horas de duración con una precipitación de 5,3 litros por metro cuadrado. El tiempo de reacción fue de 3 horas y el porcentaje infiltrado del 34,2%. Las dos primeras series están separadas 19 horas con una precipitación de 0,4 mm. Esta segunda serie, al igual que la primera, comienza en la última hora del aguacero y refleja los cambios de intensidad de precipitación sobre un caudal efluente base. Así, se observa como el aguacero en su tercera hora tiene una punta de precipitación de 3,5 litros por metro cuadrado, reflejada en la serie con apenas una hora de retraso.

La tercera serie (Figura IV-62) corresponde a un aguacero de 4 horas de duración con una precipitación de 3,5 litros por metro cuadrado. El tiempo de reacción fue de 3 horas y el porcentaje infiltrado del 25,2%. Esta serie está separada 67 horas de la anterior con una precipitación intermedia de 2,3 mm. La correspondiente precipitación es muy ligera por lo que la serie no recoge ningún cambio brusco en la intensidad de lluvia.

La cuarta serie (Figura IV-63) es la respuesta del firme permeable tipo PR a 7 horas de precipitación con un total de 14,4 litros por metro cuadrado. El tiempo de reacción fue de 2 horas y el porcentaje infiltrado del 38,6%. Esta serie está separada 115 horas de la anterior con una precipitación en este periodo de 10,2 mm. En la Figura IV-63 se pueden distinguir tres tramos, con distintas pendientes y duraciones, correspondientes a los tres picos de intensidad de la lluvia reflejada, siendo el más marcado el último, con 5,9 litros por metro cuadrado en una hora, con la reacción dentro de la misma hora de ocurrencia.

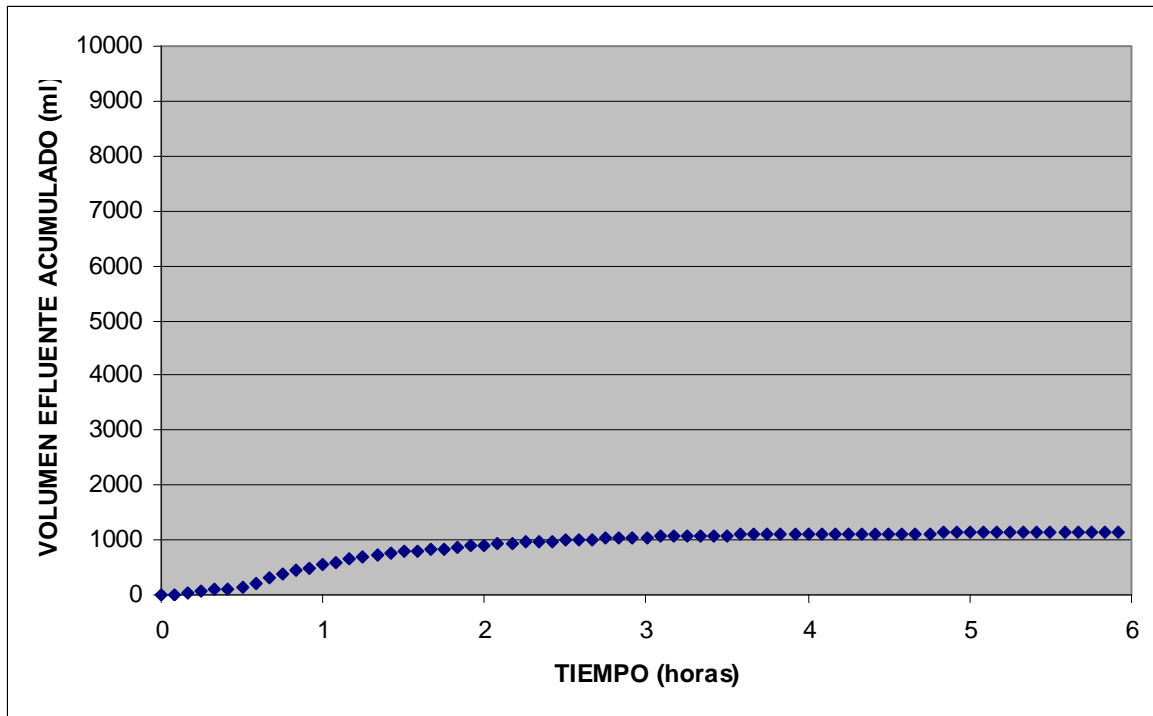


Figura IV-60. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 1/4).

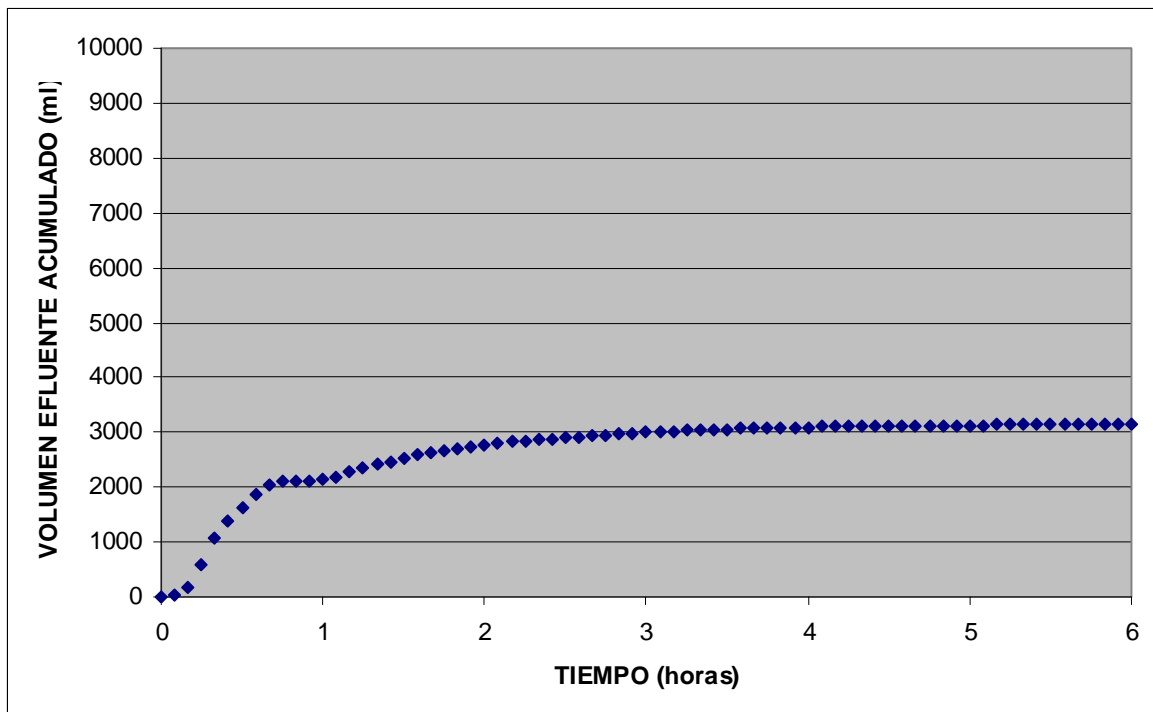


Figura IV-61. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 2/4).

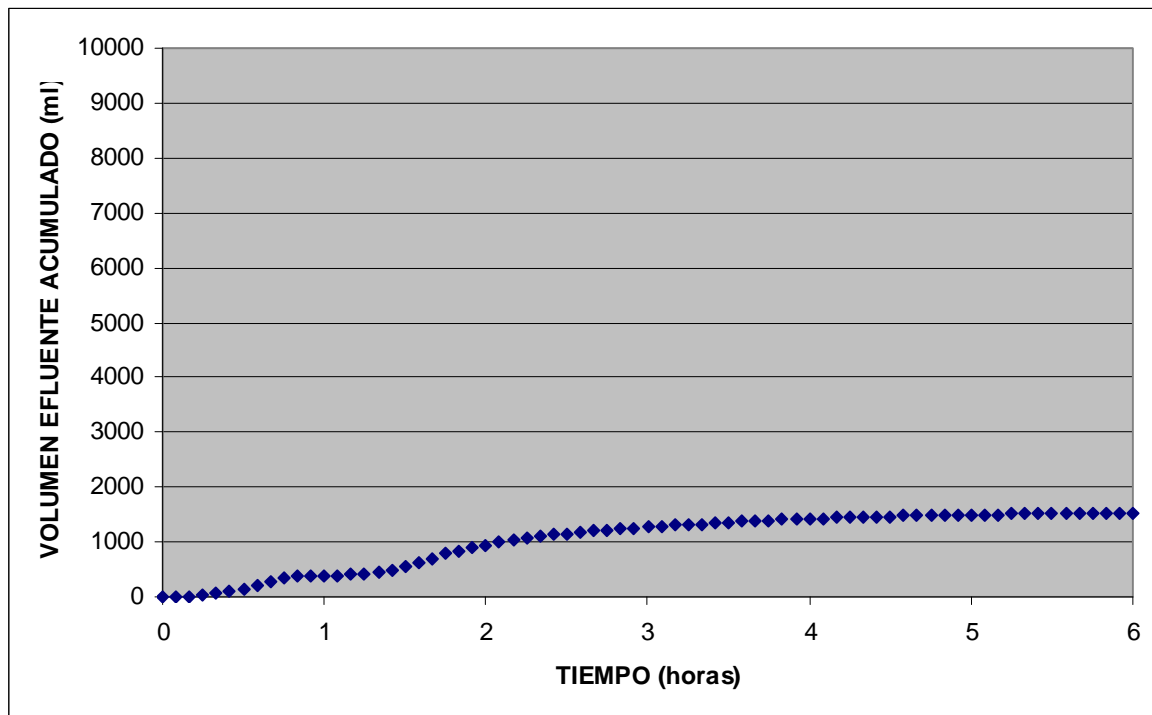


Figura IV-62. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 3/4).

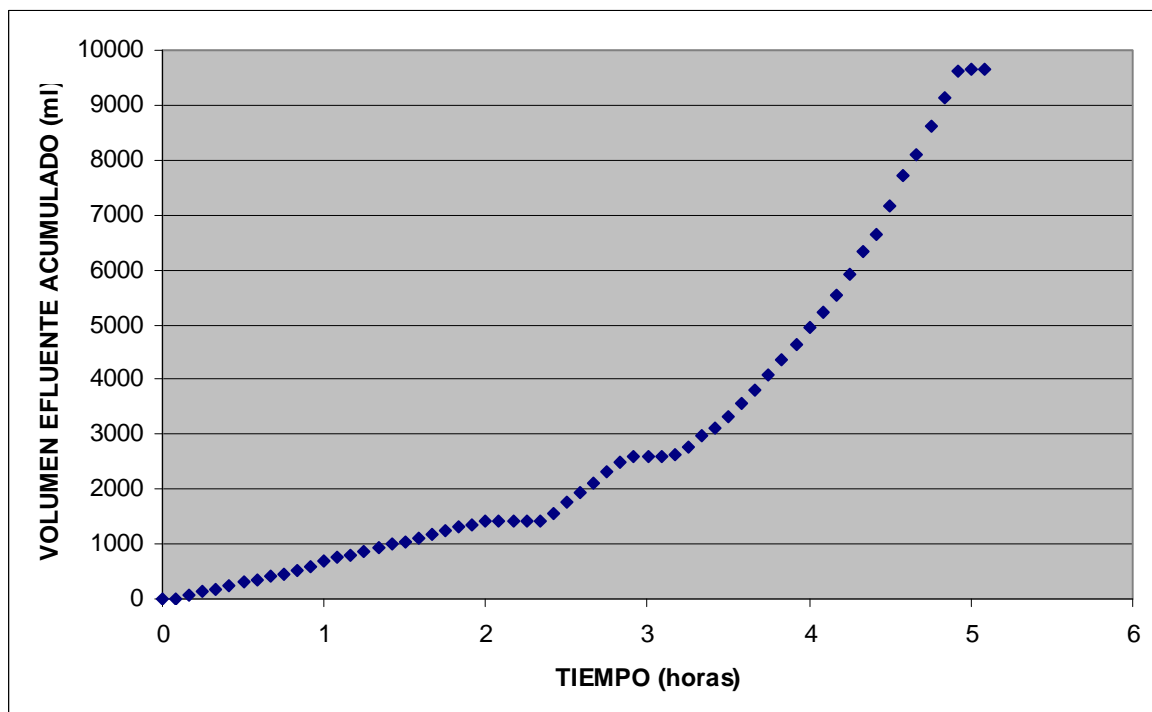


Figura IV-63. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) a una aportación de lluvia natural expresada en volumen efluente a lo largo del tiempo (serie 4/4).

En resumen, las series monitorizadas de aportaciones de agua naturales y volúmenes efluentes no permiten la comparación de las secciones estudiadas, pues corresponden a distintos periodos del año. Así, se observa como las secciones BA y PR, sin nada en común, aseguran unos porcentajes de infiltración en torno al 40%, debido a que fueron monitorizadas en periodos húmedos y lluviosos. Mientras, las secciones BR y PA, registran infiltraciones del orden 1,5% en periodos secos y calurosos. Además, no existen series de respuesta de distintas plazas frente al mismo aguacero, por lo que no es posible comparar los tiempos de reacción de las distintas secciones de firmes permeables. De todo ello, se extrae que, para obtener resultados válidos que permitiesen la comparación de secciones, sería necesario contar con la totalidad de las plazas correctamente impermeabilizadas, con una estación meteorológica en el emplazamiento y con doce equipos con registro de datos y alimentación continua. De este modo, sí sería posible medir las diferentes respuestas ante un mismo aguacero, caracterizando perfectamente el afluente y el efluente en la misma escala de tiempo y evitando posibles interrupciones en las series resultantes.

Respecto a las aportaciones de agua artificiales en Gijón, de 25 litros en un minuto, los tiempos de reacción promedio fueron de 3:05 minutos, para la sección tipo BR, 1:45 minutos, para la sección tipo BA, 2:10 minutos, para la sección tipo PA, y 5:00 minutos, para la sección tipo PR. Se puede observar como el mayor tiempo de reacción, y por tanto la mayor laminación, corresponde a la sección PR, que combina un pavimento de aglomerado poroso con capas granulares de áridos reciclados. El segundo en laminación es el firme BR, también con áridos reciclados, seguido del PA con pavimento de mezcla bituminosa porosa, siendo el firme que ofrece la reacción más rápida el de tipo BA, de adoquines y base de áridos calizos. Con estos resultados se confirma la mejor laminación obtenida con la mezcla porosa y los áridos reciclados, tanto en los modelos del Laboratorio como en los del Campus.

Las series de respuesta que se obtuvieron quedan recogidas en la Figura IV-64, para la sección tipo BR, en la Figura IV-65 para la sección tipo BA, en la Figura IV-66 para la sección tipo PA y en la Figura IV-67 para la sección tipo PR. La sección que ofrece una mejor respuesta, laminando el caudal y reteniendo el máximo, es la tipo BR, con una infiltración inferior al 10% al cabo de 2 horas de la simulación. Por su parte, las secciones BA y PR, sin ningún aspecto en común, ofrecen respuestas semejantes una vez han reaccionado, con infiltraciones al cabo de 2 horas en torno al 40%. Finalmente, las series correspondientes a la sección PA presentan respuestas rápidas con aproximadamente un 10% de infiltración en el primer cuarto de hora. Por tanto, en Gijón, se confirma la mayor laminación ofrecida por los áridos reciclados. Sin embargo, el pavimento de mezcla bituminosa muestra una respuesta más rápida que en el Laboratorio y en Campus, probablemente por el mayor índice de huecos (25% frente al 21% de media en Santander).

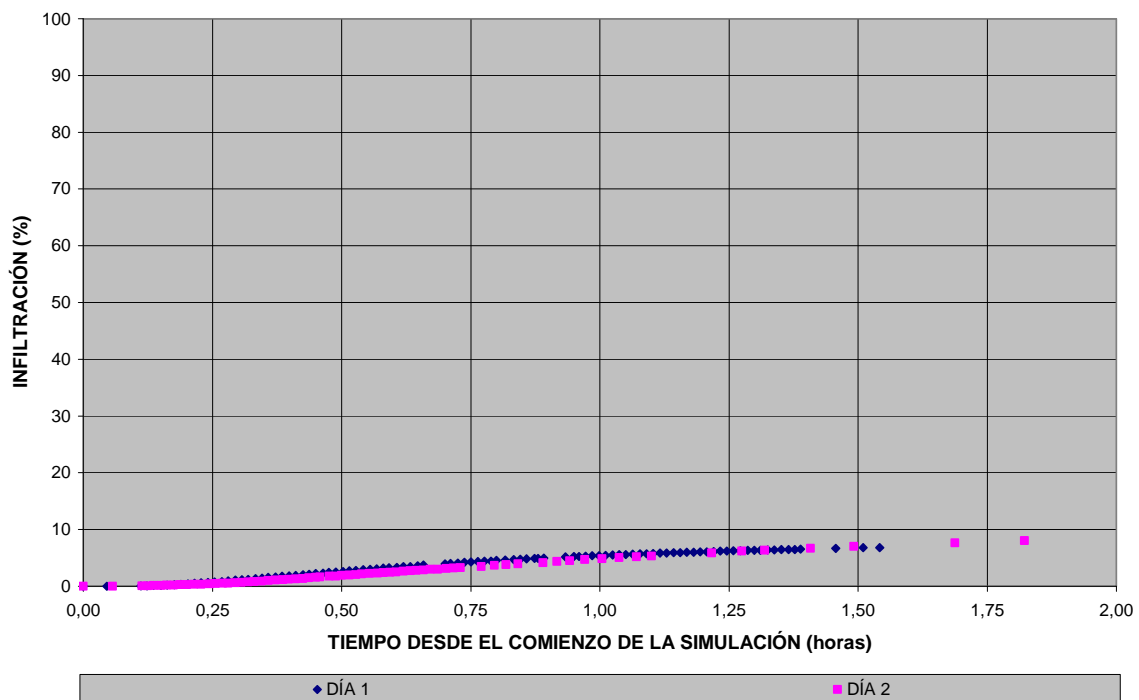


Figura IV-64. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BR de Gijón (plaza 6) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.

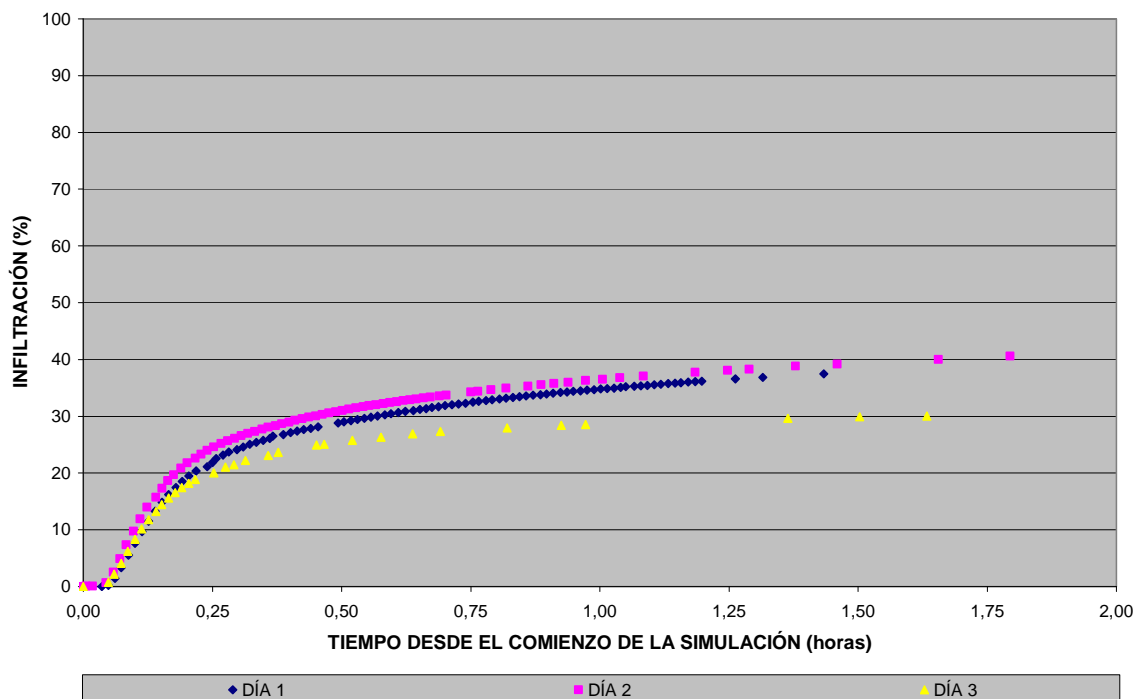


Figura IV-65. Respuesta de la sección de firme permeable tipo BA de Gijón (plaza 8) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.

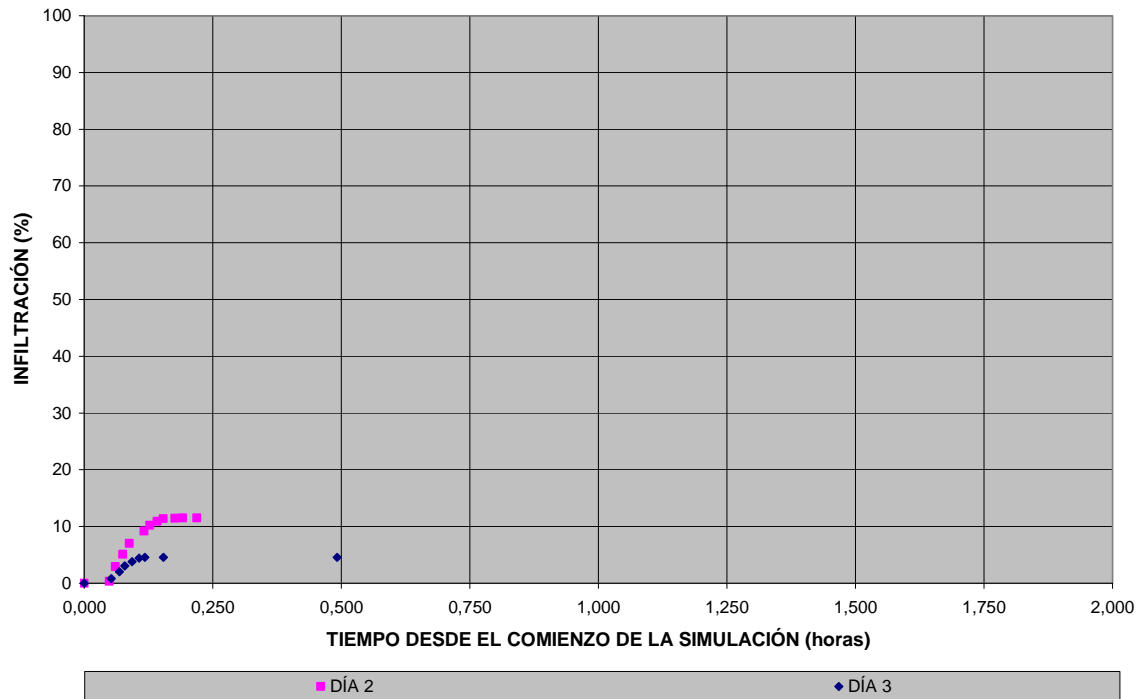


Figura IV-66. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PA de Gijón (plaza 12) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.

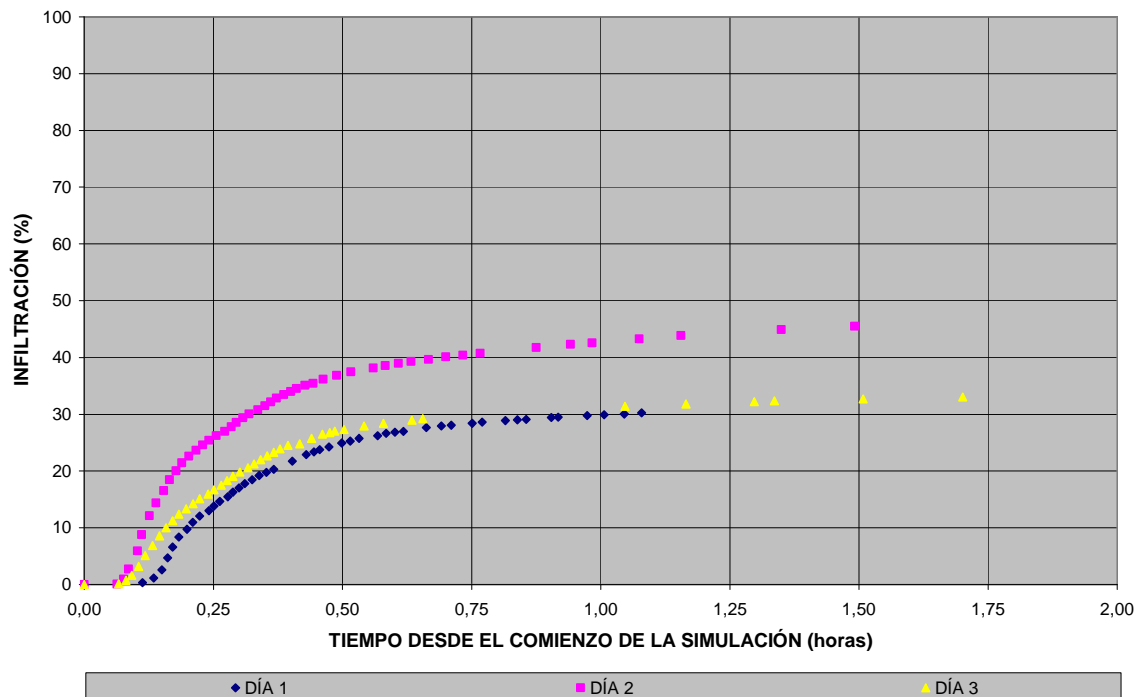


Figura IV-67. Respuesta de la sección de firme permeable tipo PR de Gijón (plaza 14) expresada en porcentaje infiltrado a lo largo de las dos horas posteriores a una simulación de lluvia.

Por último, respecto a la durabilidad asociada a la capacidad portante de las secciones permeables ensayadas en Gijón, señalar que no se ha observado ninguna degradación ni desgaste significativo debido al uso en los tres años de observación. Dada la localización del aparcamiento a las afueras de la ciudad, en la cercanía de instalaciones deportivas y terrenos destinados a ferias, su uso es esporádico, con ocupaciones puntuales muy altas (Figura IV-68). A pesar de estas solicitaciones concentradas, tan sólo se han observado ligeros desplazamientos de adoquines y leves agrietamientos de las superficies de mezcla bituminosa porosa en los bordes de las plazas, ambos defectos asociados al asentamiento de los materiales fundamentalmente tras los primeros meses de funcionamiento. Es posible que el confinamiento de los materiales de las distintas capas de los firmes esté influyendo de manera positiva en una mayor durabilidad de las secciones permeables. Sin embargo, durante la construcción esta compartimentación supuso varios inconvenientes de ejecución, siendo el principal la falta de continuidad superficial que dificultó la extensión y compactación del aglomerado poroso. Con todo, las plazas experimentales están mostrando una resistencia suficiente para soportar tráfico ligero.



Figura IV-68. Plazas de aparcamiento experimentales construidas con firmes permeables ocupadas por vehículos ligeros, aparcamiento público del Palacio de Deportes de la Guía, Gijón.

IV.5.4 CONCLUSIONES PARCIALES

De la construcción de los modelos experimentales de firmes permeables y de su análisis inicial de la funcionalidad mediante el ensayo de reacción y respuesta frente a diferentes aportaciones de agua, se han extraído las siguientes conclusiones parciales:

- En el Laboratorio, inmediatamente después de la construcción de los modelos, la reacción y la respuesta de los firmes permeables depende fundamentalmente del tipo de árido empleado en las capas inferiores, ofreciendo los áridos reciclados una mayor retención del agua que los áridos calizos procedentes de cantera.
- En el Laboratorio, al cabo del tiempo, la reacción y la respuesta de los firmes permeables depende del tipo de pavimento con el que cuentan, ofreciendo la mezcla bituminosa porosa una mejor laminación que los adoquines con ranuras.
- En el Laboratorio, los promedios de la infiltración al cabo de cuarenta y ocho horas de la simulación de lluvia son de 88,5% para la sección BR (adoquines y árido reciclado), 87,1% para la PR (aglomerado poroso y árido reciclado), 89,5% para la PA (aglomerado poroso y árido calizo) y 89,3% para la BA (adoquines y árido calizo).
- El porcentaje de infiltración en Laboratorio es mayor que en el Campus y que en Gijón probablemente debido al régimen regular de lluvias simuladas, al menor volumen de materiales de construcción y a las granulometrías más ajustadas de los áridos empleados.
- La discontinuidad de la superficie de adoquines con ranuras puede provocar un mayor número de cauces de percolación que la superficie de mezcla bituminosa porosa, la cual muestra respuestas más uniformes a las aportaciones de agua.
- En Gijón, las secciones monitorizadas en periodos húmedos y lluviosos muestran un porcentaje de infiltración en torno al 40% de la precipitación natural registrada, mientras que en periodos secos y calurosos las infiltraciones son del orden del 1,5%, probablemente debido a las mayores pérdidas por evaporación y absorción de los materiales de construcción en estos periodos.
- Los firmes permeables con pavimento de aglomerado poroso y capas granulares de árido reciclado son los que ofrecen una mayor laminación de las precipitaciones con una reacción lenta y una respuesta pausada.
- El diseño y la construcción de las áreas experimentales de firmes permeables debe realizarse llevando a cabo un estricto control de calidad que asegure su correcta ejecución, fundamentalmente en el caso de requerir impermeabilización respecto a la explanada.

CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES

V.1 RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DE FIRMES PERMEABLES

Como primer apartado del capítulo de conclusiones se presentan una serie de recomendaciones para el diseño de firmes permeables, fruto del estudio y análisis realizados y presentados en los capítulos anteriores. Estas recomendaciones se dividen en dos apartados: proyecto y construcción de firmes permeables.

V.1.1 PROYECTO DE FIRMES PERMEABLES

El diseño de una sección de firme permeable debe realizarse contemplando todos los condicionantes particulares de cada actuación. Por tanto, es necesaria una campaña exhaustiva de recogida de información. La Tabla V-1 presenta un resumen de la información básica necesaria para abordar el diseño de un firme permeable, indicando además la fuente y el destino de la misma. A esta información hay que sumar las correspondientes normativas referidas de alcance estatal, regional o local. La recogida de información previa se completará con cuantas visitas al emplazamiento de la obra sean necesarias para conocer y contrastar la validez de los datos y el grado de actualización de los mismos. Una vez recopilada y revisada toda la información, comienza el proyecto del firme permeable, el cuál está dividido en tres etapas: ajuste de la tipología, diseño de la funcionalidad y comprobación de la durabilidad.

Tabla V-1. Ficha de recogida de información propuesta para el diseño de firmes permeables.

INFORMACIÓN	FUENTE	DESTINO
Actuación.	Documentos de planificación de la correspondiente actuación.	Ajustar la tipología
Entorno.	Estudios de impacto ambiental y características naturales, sociales y económicas.	
Clima.	Agencia Estatal de Meteorología y entidades regionales equivalentes.	Diseñar la funcionalidad
Topografía.	Instituto Geográfico Nacional y administraciones públicas locales.	
Geotecnia e hidrogeología.	Instituto Geológico y Minero de España y estudios geotécnicos locales.	
Abastecimiento y drenaje.	Empresas municipales encargadas del abastecimiento y saneamiento.	
Tráfico.	Dirección General de Carreteras y administraciones públicas locales.	Comprobar la durabilidad

V.1.1.1 Ajuste de la tipología

La tipología del firme permeable a construir viene marcada por dos aspectos:

- Tipo de pavimento permeable: continuo o discontinuo.
- Tipo de gestión final del agua infiltrada: infiltración, almacenamiento o drenaje diferido (Tabla II-1).

Para un ajuste inicial de estos dos aspectos, se deben analizar en detalle los datos disponibles acerca de la actuación en la que se enmarca la construcción del firme permeable, así como las características propias del entorno sobre el que se va a actuar. Partiendo de la información referente a la actuación, recogida en documentos de planificación como planes urbanísticos o anteproyectos, se debe conocer:

- Tipo de actuación: nueva construcción o restauración.
- Diferenciación de áreas: previsión de usos y tipologías de pavimentos.
- Criterios urbanísticos y estéticos: entorno arquitectónico, pavimentos típicos y acabados exigidos.

Además, respecto al entorno de la obra, algunos aspectos importantes a tener en cuenta a la hora de fijar la tipología del firme permeable son:

- Entorno natural: proximidad de zonas sensibles de especial protección, nivel de protección de cauces y aguas subterráneas, tipo de vegetación y de fauna predominante en la zona.
- Entorno social y económico: demanda de desarrollo sostenible, marco económico de la actuación y previsiones de mantenimiento.

Con esta información, se debe situar la construcción de los firmes permeables dentro de la actuación a desarrollar y de su entorno, identificando:

- Áreas pavimentadas que podrían ser permeables: aparcamientos, viales, aceras, sendas peatonales, áreas de juegos, etc. Los firmes permeables se pueden aplicar en cualquier zona con tráfico ligero o peatonal ofreciendo distintos niveles de funcionalidad y durabilidad en función de los materiales empleados.
- Condiciones exigibles: materiales, texturas y colores. Los pavimentos permeables se adaptan a prácticamente cualquier condición de acabado, como por ejemplo el hormigón poroso con ligantes sintéticos y áridos de colores.
- Encuadre en el entorno:
 - Natural: los firmes permeables permiten una gestión adecuada del agua de lluvia en zonas protegidas y/o aisladas sin conexiones de drenaje.
 - Social: los firmes permeables pueden prevenir inundaciones e

- incluso ayudar a renovar zonas deprimidas socialmente.
- Económico: los firmes permeables pueden suponer un ahorro de agua e incluso una solución diferenciadora en zonas de nivel económico alto.
 - Previsión de posibles problemas de funcionalidad:
 - En zonas sin previsión de mantenimiento y posibles aportes de sedimentos, se deberán emplear pavimentos permeables con elevado porcentaje de huecos para retardar al máximo su colmatación.
 - Una inclinación excesiva del pavimento puede disminuir la capacidad de infiltración del mismo tanto como un aporte de sedimentos.
 - Previsión de posibles problemas de durabilidad:
 - Dependiendo de las previsiones de vertidos de hidrocarburos y/o sales contra las heladas, pueden ser convenientes determinados materiales.
 - Futuras variaciones de los usos y tráfico de la zona pueden afectar al nivel de conservación de los firmes permeables.

Así, por ejemplo, en una zona rural con abundancia de vegetación de hoja caduca y presencia de ganado, donde son típicos los suelos empedrados y no se espera mantenimiento, puede ser adecuada una tipología de adoquines con ranuras. Mientras, en los viales de acceso a una urbanización de nueva construcción, puede ser más adecuado un pavimento permeable de mezcla bituminosa porosa, con un barrido periódico que ayude a mantener su permeabilidad.

Por otra parte, si bien los firmes permeables con infiltración directa al terreno no son recomendables en zonas con el nivel freático próximo a la superficie o cimentaciones cercanas, sí lo son en zonas aisladas con terreno permeable. Mientras, los firmes permeables con almacenamiento de agua en la subbase son recomendables siempre que exista un posible aprovechamiento, por ejemplo para el riego de zonas verdes cercanas. Por último, la opción de drenaje diferido empleando sistemas subterráneos, está indicada en zonas de restauración urbanística, como centros urbanos, permitiendo eliminar las alcantarillas y sumideros de la superficie, al igual que los charcos que dificultan el tránsito durante las lluvias. Esta solución no permite la recarga de acuíferos ni la reutilización del agua de lluvia, pero asegura una laminación de la escorrentía urbana con la consiguiente prevención de inundaciones.

Con todo, debe realizarse un ajuste inicial de la tipología del firme, decidiendo los tipos de pavimentos permeables a emplear en cada zona y el tipo de gestión que se va a realizar con el agua infiltrada. Por ejemplo, un firme de grava reforzada con almacenamiento de agua en las zonas de aparcamiento, de mezcla bituminosa porosa con drenaje diferido en los viales y de adoquines con ranuras e infiltración al terreno en las aceras.

V.1.1.2 Diseño de la funcionalidad

Para ser funcional un firme permeable debe ofrecer unas adecuadas capacidades de infiltración y depuración. Respecto a la capacidad de infiltración, el firme permeable debe cumplir las siguientes misiones fundamentales:

- Infiltrar un volumen de agua afluente: gracias a un pavimento permeable que permita la entrada del agua al firme permeable.
- Gestionar un volumen de agua efluente: gracias a unas capas inferiores con unas adecuadas características de permeabilidad y volumen de huecos.

El volumen de agua afluente que recibe un firme permeable proviene de la suma de la precipitación directa sobre el propio pavimento, más la escorrentía superficial proveniente de las zonas impermeables adyacentes que drenen a dicho pavimento. Este volumen afluente se puede estimar teniendo en cuenta los datos disponibles de clima y topografía de la zona de actuación. La información fundamental sobre el clima del emplazamiento del firme permeable que es necesario conocer para realizar un correcto diseño es el régimen de precipitaciones. Así, se debe contar con el máximo de datos posible referidos a las lluvias, destacando precipitaciones máximas y curvas de intensidad-duración-frecuencia. Respecto a la topografía de la zona, esta debe analizarse desde el punto de vista de la hidrología, identificando las cuencas vertientes del área de actuación y entre ellas el área impermeable que drene sobre el emplazamiento del firme permeable, considerando las posibles modificaciones futuras que la pudiesen afectar.

La precipitación de diseño de un firme permeable debe tener un periodo de retorno y una duración determinados, afectando la intensidad resultante a una superficie conocida. El criterio de elección del aguacero de diseño es flexible, dependiendo del nivel de funcionalidad que se le pretenda dar al firme permeable. Normalmente, es suficiente con considerar un periodo de retorno entre dos y diez años, con una duración de la precipitación igual al correspondiente tiempo de concentración de la cuenca impermeable vertiente, o en su defecto cinco minutos. Con la precipitación correspondiente sobre la cuenca del firme permeable es posible obtener el volumen afluente que debe ser infiltrado por el pavimento permeable, fijando de este modo la capacidad de infiltración mínima a exigir.

Prácticamente cualquier pavimento permeable recién colocado cuenta con una capacidad de infiltración muy por encima de lo estrictamente necesario. Sin embargo, existe un riesgo variable de colmatación a lo largo del tiempo que debe ser tenido en cuenta. Así, repasando la información disponible sobre el clima y la topografía de la zona de actuación, se deben evaluar aspectos como: riesgo de heladas, posibles acumulaciones de nieve, zonas de

sombra y, fundamentalmente, intensidad y dirección predominante del viento, identificando zonas protegidas y zonas expuestas a la erosión eólica. Además, se debe considerar la posibilidad de obras cercanas que puedan aumentar la tasa natural de aporte de sedimentos al pavimento permeable. Con todo, se debe extraer una valoración del riesgo de colmatación del firme permeable en forma de coeficiente de seguridad, el cual debe ser como mínimo del orden de 10, pudiendo considerarse órdenes mayores como 100 ó incluso 1.000 al disminuir la esperanza de mantenimiento.

Respecto a la gestión del volumen efluente, se debe analizar la información disponible sobre la geotecnia e hidrogeología del área de actuación, comprobando la adecuación de la tipología seleccionada de firme permeable. Se debe conocer la estratificación del terreno, los tipos de suelos presentes, sus espesores y permeabilidades, localizando la profundidad del estrato permeable y del nivel freático, situando sus máximos y mínimos a lo largo del año. Además, es necesario repasar la situación de los acuíferos, su nivel de protección y los aprovechamientos existentes para usos potables o no potables. Así, dependiendo de las condiciones del terreno del emplazamiento, se comprobará si es posible la opción de infiltrar el agua efluente directamente para la recarga de acuíferos. En caso de no ser posible la infiltración al terreno, se analizará la información disponible sobre el abastecimiento de agua y drenaje de la zona de actuación. Se identificarán usos no potables en las proximidades, como por ejemplo el riego de jardines o la limpieza de calles, y se estimarán los volúmenes de agua necesarios para satisfacer dichos consumos. Además, se debe comprobar el estado de saturación del sistema de drenaje de pluviales de la zona, identificando problemas existentes y analizando posibles puntos de conexión diferida. Con esta información, se debe comprobar cuál de las dos opciones restantes de gestión del agua efluente es la más adecuada: almacenamiento para reutilización o drenaje subterráneo diferido.

Una vez comprobada la elección del tipo de gestión del agua efluente, se deben diseñar las capas inferiores del firme permeable a tal efecto. En todos los casos se debe asegurar una permeabilidad creciente con la profundidad a partir del pavimento permeable, siendo los geotextiles de filtro y separación los principales puntos de comprobación. Estos geotextiles deben tener una abertura de poro y una permeabilidad adecuadas. Respecto a la capa subbase, su espesor será el necesario para albergar la diferencia de volumen entre el afluente y el efluente durante un determinado periodo de tiempo. Este espesor será mayor o menor en función de la porosidad del material, que se puede considerar en el rango 30-40% para capas granulares, y en torno al 90% para estructuras de plástico. Por último, para las opciones sin infiltración, el volumen de la subbase debe estar perfectamente impermeabilizado, contando el firme con los correspondientes sistemas de bombeo, desagües de fondo y aliviaderos.

V.1.1.3 Comprobación de la durabilidad

La durabilidad de un firme permeable está directamente asociada a su capacidad portante, siendo esta la propiedad que le permite soportar las cargas aplicadas sobre él a lo largo del tiempo. Por tanto, el proyecto de un firme permeable no está completo sin la correspondiente comprobación estructural del mismo. Para ello, se deben considerar el tipo y la intensidad del tráfico en las distintas zonas en las que se vayan a aplicar firmes permeables. Todo ello previendo cualquier modificación futura que pudiese darse.

Actualmente, las aplicaciones de los firmes permeables se realizan en espacios urbanos que deben soportar niveles de tráfico ligeros: intensidades medias diarias (IMD) de vehículos pesados inferiores a 50. Las correspondientes categorías de tráfico serían, según la norma para carreteras 6.1-IC (Instrucción de carreteras, 2003): T41 y T42. O bien, adoptando la clasificación de tráfico urbanos propuesta por Manchón *et al.* (2000) en sus recomendaciones para el proyecto y diseño del viario urbano: D, E, F y G (tráfico peatonal). Así, por ejemplo, en los aparcamientos de superficie situados a las afueras de las ciudades, podría considerarse una IMD estimada de 10 vehículos pesados al día.

Para soportar estas solicitaciones, las resistencias de los materiales de construcción y los espesores de las distintas capas del firme permeable deben ser adecuados. Así, el primer paso es comprobar la calidad de la explanada, parámetro fundamental para asegurar la correcta capacidad portante del conjunto del firme. En todos los casos, la explanada debe ofrecer un soporte mínimo con un CBR mayor de 5, debiendo aumentar esta exigencia al aumentar el tráfico considerado. Respecto a las capas base y subbase, estas deben asegurar una correcta transmisión de las cargas a la explanada, bien mediante el empleo de áridos de granulometría lo más continua posible o de estructuras de plástico con resistencias suficientes. Con todo, los espesores estimados para asegurar la funcionalidad del firme suelen ser superiores a los necesarios desde el punto de vista estructural, tomando como referencia el catálogo de firmes urbanos de Manchón *et al.* (2000). En caso de ser necesario, es posible reforzar las secciones permeables con geosintéticos o estabilizaciones con cemento, empleando hormigones porosos pobres. Respecto al pavimento permeable, se debe comprobar la adecuación de los materiales empleados para su construcción a las circunstancias del emplazamiento. Estos materiales deben soportar los esfuerzos tangenciales, solicitaciones de gran importancia en zonas urbanas originadas principalmente por el frenado y la aceleración de los vehículos. Además, estos materiales deben presentar una probada durabilidad frente a la acción del agua y el posible efecto de los vertidos de hidrocarburos (combustibles, aceites y grasas sobre mezclas bituminosas porosas) o de las sales antihielo (sobre el hormigón poroso).

V.1.2 CONSTRUCCIÓN DE FIRMES PERMEABLES

V.1.2.1 Materiales

La correcta selección de los materiales de las distintas capas de los firmes permeables es fundamental a la hora de llevar a cabo su construcción con éxito. A continuación se comentan algunos aspectos fundamentales referidos a los principales materiales tratados durante la investigación desarrollada:

- Adoquines.
- Mezcla bituminosa porosa.
- Capas granulares.
- Geotextiles.

Los adoquines para pavimentos permeables son bloques prefabricados de hormigón que pueden tener geometrías especiales para permitir el paso del agua una vez dispuestos. Estos adoquines deben colocarse a tope y con límites de confinamientos, resultando una superficie con ranuras libres o rellenas de recebo permeable que permitan la infiltración del agua. La geometría más común de estos adoquines es la rectangular con un largo de 20 cm y un ancho de 10 cm. El espesor de los adoquines puede variar entre 6, 8 y 10 cm, aumentando según la estabilidad que se le quiera otorgar al pavimento. Así, los adoquines de 6 cm de espesor están únicamente indicados para zonas peatonales y los de 10 cm para zonas con tráfico medio-ligero. Los adoquines se dispondrán sobre una base de arena gruesa o arcillo, sin partículas inferiores a 2 mm. Una vez que la cama de asiento ha sido nivelada no debe pisarse, por lo que la colocación de los adoquines se realiza desde el pavimento terminado. La compactación del conjunto se realizará una vez colocados todos los adoquines para evitar los desplazamientos de las piezas, aberturas de las juntas y pérdidas de trabazón entre los adoquines.

Si se decide rellenar los espacios entre adoquines, ha de cuidarse que el material de relleno sea drenante, evitando la presencia de finos. Cualquier incremento del porcentaje de finos en los materiales de relleno o el sellado de los espacios entre adoquines conlleva una importante disminución de la capacidad de infiltración del pavimento. Si no se usa recebo permeable es necesario aumentar el espesor de los adoquines, pues el pavimento reparte las cargas por contacto directo entre caras laterales y al no contar con recebo este contacto puede ser menor. Por esta razón, se debe aumentar el espesor del adoquín, y por tanto su peso, así como cuidar su disposición respecto a la dirección predominante del tráfico, buscando la mayor trabazón y mejor transmisión de cargas, todo ello para mejorar la estabilidad final del pavimento.

Respecto a la mezcla bituminosa porosa, esta puede ser una mezcla fabricada en caliente con un porcentaje final de huecos en mezcla entre el 20% y 25%. En España, este tipo de mezcla drenante corresponde con el huso granulométrico PA-12 del artículo 542 "Mezclas bituminosas en caliente" del PG-3 (2007), si bien se recomienda minimizar el contenido de arena 2-4 mm para aumentar el contenido de huecos. Para la ejecución de la mezcla bituminosa porosa en caliente, se recomienda la utilización de áridos silíceos u ofíticos, con alta resistencia al desgaste, y betún modificado BM-3b, asegurando la obtención de mezclas con elevada resistencia al desgaste, incluso sometidas a vertidos de hidrocarburos. Se recomienda igualmente que la dosificación de ligante sea la mínima indicada para una mezcla drenante: 4,5% respecto al peso de los áridos.

El empleo de betunes modificados permite aumentar el porcentaje de huecos de la mezcla sin disminuir su resistencia. No obstante, aumentar los huecos de la mezcla supone aumentar los tamaños de sedimento que pueden afectarla y la profundidad de penetración de estos sedimentos en la misma. Fundamentalmente esta mayor penetración de los sedimentos puede dificultar el mantenimiento de la capacidad de infiltración de este material a lo largo del tiempo. Mientras, una porosidad baja de la capa superficial garantiza un efecto filtro, reteniendo los sedimentos de mayor tamaño en superficie y limitando la penetración de las partículas colmatantes. Este efecto filtro facilita la limpieza superficial de la mezcla bituminosa porosa y por tanto el mantenimiento de la permeabilidad a lo largo del tiempo.

En resumen, una superficie de mezcla bituminosa porosa para pavimentos permeables debería contar con al menos dos capas fabricadas con betún modificado, disponiendo la capa superior con un menor porcentaje de huecos a modo de filtro. De este modo el barrido superficial permitiría mantener la capacidad de infiltración, aún no eliminando todas las partículas colmatantes, y la mezcla tendría una adecuada durabilidad frente a los esfuerzos tangenciales del tráfico.

Comparando ambos tipos de pavimentos permeables se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Los adoquines permiten un acabado de mayor calidad estética, mientras que la mezcla bituminosa porosa permite una puesta en obra más rápida y económica.
- Los adoquines tardan más en colmatarse pero requieren de un mantenimiento con una mayor profundidad de acción que las mezclas bituminosas porosas.
- Los adoquines no sufren afecciones por vertido de hidrocarburos, mientras que en las mezclas bituminosas porosas, estas dependen del tipo de betún empleado en su fabricación.

Respecto a las capas granulares, los áridos empleados en su ejecución pueden ser procedentes de cantera o reciclados de residuos de construcción y demolición (RCDs). Los áridos procedentes de cantera se emplearán en las zonas sometidas a una solicitud de tráfico mayor exigiendo una mayor calidad de los mismos: coeficiente de desgaste de Los Angeles inferior a 30 y equivalente de arena superior a 40. Por su parte, los áridos reciclados se emplearán en zonas con solicitudes de tráfico menores, exigiéndoles un nivel de limpieza adecuado y un porcentaje predominante de hormigón y cerámica triturados.

A la hora de fijar el tamaño de las partículas, se debe tener en cuenta que una granulometría continua de las capas granulares inferiores, con presencia de finos, puede llegar a ser un factor limitante para la infiltración de la escorrentía superficial debido a su baja permeabilidad en comparación con el resto de capas. Mientras, una granulometría uniforme, sin ningún fino, puede reducir el efecto de laminación de puntas debido a una excesiva permeabilidad. Además hay que considerar que una granulometría continua permite un mayor grado de compactación, y por tanto una mejor transmisión de las cargas, mientras que una granulometría uniforme requiere un confinamiento que asegure la correcta transmisión de esfuerzos. Por tanto, se debe llegar a una solución de compromiso que aúne las condiciones de funcionalidad y de durabilidad. Por ejemplo, si el objetivo principal del firme permeable es la laminación, se deben elegir granulometrías lo más continuas posibles, procurando eliminar los finos por debajo de 2 mm para evitar posibles afecciones estructurales causadas por la acción del agua. Mientras, si el objetivo es el almacenamiento, se deben seleccionar granulometrías lo más uniformes posibles, maximizando el porcentaje de huecos y por tanto el volumen libre para albergar el agua infiltrada. Como granulometría de referencia, se recomienda la zavorra drenante ZAD 20 recogida en el artículo 510 del PG-3 (2007). En cualquier caso, previo al inicio del extendido se deberá formar un acopio de árido, el cual deberá ser ensayado, comprobando la granulometría y la idoneidad para la aplicación marcada. Posteriormente, se procederá al extendido en tongadas con espesor no superior a 30 cm hasta conseguir el espesor final de capa indicado.

Por último, respecto a los geosintéticos, los geotextiles deben presentar un tamaño de poro, una permeabilidad y una resistencia al punzonamiento adecuados a su posición en la estructura del firme. Así, con una selección adecuada de los geotextiles es posible evitar problemas de colmatación, retención del flujo y degradación de la estructura del firme. Por su parte, las geomembranas que se utilicen en los firmes con almacenamiento o drenaje diferido deben asegurar una total estanqueidad del fondo del firme. Las geomembranas contarán con las capas de geotextil de protección que se estimen necesarias, tanto en el contacto con la explanada, como para recibir los materiales de la subbase.

V.1.2.2 Control de calidad

La prevención de los problemas de funcionalidad y durabilidad de los firmes permeables debe comenzar durante la construcción, debiendo exigirse la máxima limpieza posible en la zona de obra, de manera que no se afecte a las granulometrías de las capas inferiores y no se ensucien los pavimentos permeables ejecutados. Además, se debe exigir la mayor calidad posible a los materiales y procedimientos de ejecución empleados.

Para el control de calidad durante la construcción de firmes permeables, autores como Alfakih *et al.* (1995) han adaptado diversas herramientas de evaluación: árboles causa-efecto, análisis de riesgos y matrices de interconexión entre otras. La conclusión de todos los estudios realizados es que el control de la calidad es de suma importancia durante la ejecución de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en general, y durante la ejecución de los firmes permeables en particular.

Algunas labores del control de calidad que deben llevarse a cabo durante la construcción de firmes permeables son:

- Certificar las características reales de los geosintéticos mediante ensayos en laboratorio, cuidar sus condiciones de almacenamiento, comprobar su estado antes de ser colocados y vigilar que se realicen los solapes necesarios.
- Probar la estanqueidad de la subbase para certificar la correcta acción de las geomembranas en los límites de los firmes permeables que así lo requieran.
- Comprobar las granulometrías de los materiales granulares empleados y vigilar que no se vean afectadas durante la construcción.
- Controlar que los espesores de las distintas capas y los materiales empleados se correspondan con los fijados en el correspondiente proyecto.
- Supervisar la colocación de los adoquines, comprobando la granulometría de la cama de asiento y las condiciones de confinamiento lateral.
- Supervisar la compactación de las capas de mezcla bituminosa porosa, comprobando el porcentaje resultante de huecos en mezcla.
- Medir la capacidad de infiltración de la superficie recién colocada mediante ensayos con el ICP (Infiltrómetro Cántabro Portátil) para comprobar el estado inicial del firme permeable.

Con todo, es necesaria la redacción de recomendaciones y normativa específica para que la calidad de ejecución de los firmes permeables permita asegurar su correcto funcionamiento a lo largo de la vida útil más amplia posible.

V.1.2.3 Mantenimiento

Sin mantenimiento, los pavimentos permeables pueden estar colmatados en tres años (Legret, 2001; Scholz *et al.* 2007) o pueden mantener su capacidad de infiltración más de 6 años (Raimbault *et al.*, 1985; Brattebo *et al.* 2003). Todo depende del aporte de sedimentos que tenga el emplazamiento. Mientras, con un correcto mantenimiento, la vida útil de un firme permeable puede alcanzar los veinte años, tanto para superficies continuas (Caltrans, 2007), como discontinuas (Shackel, 2006). No obstante, el coste del mantenimiento puede llegar a ser elevado y la frecuencia necesaria de limpieza puede ser alta, dependiendo de las condiciones específicas de cada localización, por lo que en muchas aplicaciones se acepta la pérdida de permeabilidad y no se realiza mantenimiento alguno (McCormack, 2006).

En general, el mantenimiento de un firme permeable debe programarse en función de los resultados de una serie de inspecciones periódicas, realizadas con el objetivo de comprobar los aportes de sedimentos recibidos por el firme permeable. Así, todos los firmes permeables deben ser inspeccionados varias veces durante los primeros meses después de su construcción y posteriormente, como mínimo una vez al año. Las inspecciones deben realizarse después de grandes lluvias para comprobar el correcto funcionamiento de la superficie (Caltrans, 2007). Los diagnósticos realizados durante estas inspecciones deben realizarse en base a ensayos de capacidad de infiltración en campo, bien con el permeámetro LCS o con el ICP (Infiltrómetro Cántabro Fijo).

Experiencias previas han mostrado la gran dificultad existente en recuperar capas permeables muy colmatadas, siendo mucho más efectiva la limpieza periódica preventiva a la hora de mantener la funcionalidad del pavimento (Goacolou, 1993). Por esta razón, y a la vista de los resultados obtenidos en laboratorio con el Infiltrómetro Cántabro Fijo (ICF), es recomendable realizar las limpiezas antes de alcanzar niveles de colmatación altos sin posibilidad de recuperación, fundamentalmente en los pavimentos permeables de adoquines con ranuras. El momento más adecuado para realizar la limpieza suele ser a finales de invierno y comienzos de primavera, después de lluvias importantes que hayan podido ablandar los sedimentos depositados, facilitando y mejorando la eficacia del mantenimiento (de Solminihac y Castro, 2002).

Respecto a las medidas preventivas que minimicen los aportes de sedimentos, Hogland *et al.* (1987) analizaron la evolución a lo largo del tiempo de dos experiencias con firmes permeables. De ambas experiencias extrajeron importantes conclusiones para el mantenimiento de firmes permeables:

- Las zonas verdes no deben drenar directamente sobre los pavimentos permeables,

minimizando así el principal aporte natural de sedimentos.

- Los firmes permeables deben ser cubiertos cuando existen obras cercanas, minimizando así el principal aporte artificial de sedimentos.

La colmatación con tierra vegetal es un riesgo cuya importancia depende del entorno del pavimento permeable y de las medidas preventivas adoptadas, siendo posible, en caso de producirse, la limpieza con agua a presión (Raimbault *et al.*, 1985). Además, según Schlüter y Jefferies (2005), la escorrentía procedente de zonas en obra es la que más afecta a la vida útil de los sistemas de infiltración. Así, el control de la erosión debe ser más intenso en parques y zonas de obras cercanas a los firmes permeables.

Además, la eficacia del mantenimiento se ve afectada por el tipo de pavimento y las condiciones en que se encuentre, más que por las diferencias entre los equipos empleados, siendo más fáciles de limpiar, en general, las superficies lisas que las rugosas (Temprano *et al.*, 1996). Respecto a los mecanismos de limpieza, el más efectivo, empleado con mezclas bituminosas porosas, consiste en la proyección de agua a presión y el aspirado inmediato de la suciedad movilizada por el agua, resultando una superficie limpia y seca. Este sistema, con pasadas cada seis meses, comenzando un año después de la puesta en obra de la mezcla porosa, es capaz de recuperar del 80% al 90% de la permeabilidad inicial (Membrillo Medrano, 1995). Legret *et al.* (1996) señalan también el uso de agua a presión y succión como método de mantenimiento y recuperación de pavimentos permeables.

Con todo, en España, bastaría con aplicar a los firmes permeables el mantenimiento indicado en la norma tecnológica de jardinería y paisajismo NTL 14L, titulada: “Mantenimiento y conservación de los espacios verdes. Mantenimiento de la obra civil: elementos de urbanización” (Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas y Peritos Agrícolas de Cataluña, 2001): categorías y requerimientos de mantenimiento, apartado de permeabilidad; e inspecciones y operaciones de mantenimiento y conservación de los elementos de urbanización, apartado de operaciones de limpieza y mantenimiento de pavimentos.

Por último, ya sea al final de la vida útil o con anterioridad, puede ser necesaria una restitución de un pavimento permeable. En este punto, los pavimentos discontinuos presentan una ventaja fundamental, dada su sencillez de restitución, frente a los pavimentos continuos. Para el caso de mezcla bituminosa porosa, Membrillo Medrano (1995) señala la posibilidad de utilizar mezclas en frío abiertas sin recebar para el bacheo, tratando cuidadosamente los bordes para no crear discontinuidades en la infiltración.

V.2 CONCLUSIONES

V.2.1 PARTICULARES

De las conclusiones parciales de los cinco apartados en los que se han dividido los resultados y discusión de la presente tesis son de destacar las siguientes:

- La capacidad de infiltración disminuye, tanto al aumentar la carga de sedimentos sobre la superficie, como al aumentar la inclinación de la misma.
- Los adoquines con ranuras alargadas y estrechas o la mezcla bituminosa con menores huecos en la superficie, actúan a modo de filtro superficial condicionando la penetración y colocación de las partículas colmatantes.
- Una carga ligera de sedimentos sobre una superficie permeable con inclinación puede llegar a tener un efecto beneficioso al retener el flujo de la escorrentía superficial, permitiendo un mayor tiempo de infiltración.
- Los pavimentos permeables de adoquines con ranuras presentan una mayor resistencia a la colmatación que los de mezcla bituminosa porosa.
- El barrido superficial de un pavimento permeable de adoquines con ranuras colmatado al máximo no es suficiente para recuperar la capacidad de infiltración perdida, mientras que aplicado a una mezcla bituminosa porosa sí es suficiente.
- La metodología de ensayo del LCS es más rápida y sencilla que la del ICP pero es fundamentalmente aplicable a pavimentos continuos.
- El ICP permite estimar la altura de inundación asociada a cualquier tipo de pavimento urbano ante un determinado aguacero simulado, permitiendo el diagnóstico de su capacidad de infiltración.
- Con una dosificación fija de ligante, el betún más adecuado para fabricar mezclas bituminosas con una alta resistencia a los derrames de hidrocarburos es el betún modificado BM-3b.
- Inmediatamente después de la construcción, la reacción y la respuesta de los firmes permeables depende del tipo de árido empleado en las capas inferiores, mientras que al cabo del tiempo depende del tipo de pavimento.
- Los firmes permeables con pavimento de mezcla bituminosa porosa y capas granulares de árido reciclado ofrecen una reacción más lenta y una respuesta más pausada que los firmes permeables con adoquines y árido calizo procedente de cantera.
- El diseño y la construcción de las áreas experimentales de firmes permeables debe llevarse a cabo con un estricto control de calidad que asegure su correcta ejecución.

Además, las conclusiones particulares que dan respuesta a los objetivos particulares marcados al inicio de la tesis son las siguientes:

- El estudio del arte ha permitido identificar como principales problemas de los firmes permeables la colmatación, o bloqueo superficial, y la degradación de las mezclas bituminosas porosas por la acción de los vertidos de hidrocarburos.
- En base a los estudios previos, se han seleccionado cuatro tipos de secciones permeables de firmes para vías urbanas con tráfico ligero, combinando pavimentos de adoquines con ranuras y mezcla bituminosa porosa con capas granulares de áridos reciclados y calizos.
- Los ensayos llevados a cabo con el ICF (Infiltrómetro Cántabro Fijo) en el laboratorio permiten la comparación de la resistencia a la colmatación de diferentes tipos de pavimentos permeables.
- Los ensayos llevados a cabo con el ICP (Infiltrómetro Cántabro Portátil) en campo permiten el diagnóstico de la capacidad de infiltración de cualquier tipo de pavimento urbano.
- Los ensayos de escurrimiento y semi-inmersión, desarrollados para la evaluación de la resistencia de las mezclas bituminosas porosas a los vertidos de hidrocarburos, permiten la selección del tipo de betún más adecuado para asegurar la correcta durabilidad del pavimento.
- La ejecución de los modelos de secciones completas de firmes permeables en el Laboratorio FIDICA, en el Campus de Santander y en el aparcamiento experimental de la Guía en Gijón, han permitido la detección de los principales problemas asociados a la construcción y monitorización de este tipo de firmes, así como una comparación funcional inicial de los mismos.
- En base al estudio del estado del arte y al análisis experimental llevado a cabo, se han recogido una serie de recomendaciones sobre el diseño de firmes permeables.

Además, se han comprobado y ajustado las hipótesis particulares de partida:

- El principal inconveniente de los firmes permeables es la colmatación de la superficie; sin embargo, la afección a la funcionalidad no tiene porque ser crítica y existen técnicas de mantenimiento que permiten la recuperación.
- La durabilidad de un firme permeable de mezcla bituminosa porosa está condicionada por la durabilidad del betún empleado, el cual puede verse afectado por los vertidos de hidrocarburos en mayor o menor medida.
- Distintos tipos de firmes permeables tienen distintas funcionalidades, ayudando su caracterización y diagnóstico a la toma de decisiones de diseño y mantenimiento.

V.2.2 GENERALES

El proyecto de referencia REN2003-05278, “Desarrollo de nuevas estructuras de firmes biodegradantes de hidrocarburos (FIDICA)”, en el cual se enmarca esta tesis, fue valorado con la calificación de muy satisfactorio en noviembre de 2007, por la Dirección General de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia, dando por cumplidos los objetivos generales marcados en el mismo. Del mismo modo, los proyectos de investigación desarrollados con las empresas Bloques Montserrat y Emilio Bolado han sido valorados positivamente, dando lugar a diversas publicaciones científicas y aplicaciones prácticas que validan las metodologías y resultados presentados.

Por tanto, la presente tesis, ocupada del “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”, concluye dando por cumplidos sus objetivos generales de partida:

- Se ha estudiado la técnica constructiva de los firmes permeables.
- Se han propuesto nuevas secciones con áridos reciclados.
- Se ha analizado experimentalmente, en laboratorio y a escala real, el comportamiento de las secciones propuestas.
- Se han recogido las principales recomendaciones para el diseño y construcción de firmes permeables.

En conclusión, esta tesis ha probado la funcionalidad, desde el punto de vista de la capacidad de infiltración, y la durabilidad de varios tipos de firmes permeables, comprobando su correcta aplicación en aparcamientos con tráfico ligero y validando la hipótesis de partida.

Por último, destacar que los firmes permeables son secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, a lo largo del tiempo, ofreciendo en conjunto la capacidad portante necesaria para resistir un tráfico ligero determinado. La aplicación de este tipo de firmes tiene un gran número de ventajas y fundamentalmente dos inconvenientes: la colmatación que puede disminuir su funcionalidad a lo largo del tiempo y la degradación de los materiales de construcción que afecta directamente a su durabilidad. Por tanto, este tipo de firmes no son infalibles, como ningún otro tipo de firme; sin embargo, a través del estudio y análisis de sus inconvenientes, se ha mostrado como es posible ajustar su correcto diseño para potenciar al máximo sus ventajas en cada caso particular de aplicación.

V.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las líneas de investigación sobre Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en general, y sobre firmes permeables en particular, ofrecen múltiples posibilidades de desarrollo a partir de este trabajo inicial. Así, las futuras actividades de investigación relacionadas los firmes permeables son múltiples y variadas, pudiendo agruparse en dos categorías según el aspecto en el que se centre su desarrollo: funcionalidad o durabilidad.

Considerando como primer aspecto el estudio la funcionalidad de los firmes permeables, desde el punto de vista de la capacidad de infiltración y de la prevención de la colmatación, los principales objetivos de investigación futuros son:

- Perfeccionar y normalizar el ensayo de resistencia a la colmatación con el ICF (Infiltrómetro Cántabro Fijo).
- Ensayar con el ICF nuevos tipos pavimentos permeables (césped reforzado y hormigón poroso) e incluso secciones completas de firmes permeables, probando diferentes combinaciones de intensidades de lluvia y de escorrentía superficial.
- Perfeccionar y normalizar el ensayo de capacidad de infiltración en campo con el ICP (Infiltrómetro Cántabro Portátil).
- Ensayar con el ICP nuevos tipos de pavimento (hormigón impermeable y hormigón poroso), probando diferentes intensidades de lluvia simulada y tiempos de ensayo.
- Simular distintos niveles de colmatación en los modelos experimentales construidos en el Laboratorio y en el Campus para monitorizar la evolución con el tiempo de las reacciones y respuestas de los mismos ante las simulaciones de lluvia a partir del aporte de sedimentos.
- Construir nuevos modelos experimentales a escala real, correctamente impermeabilizados, que permitan la monitorización simultánea de varias réplicas sometidas a los mismos aguaceros, tanto naturales como simulados.
- Estimar el umbral de escorrentía subterránea de los distintos tipos de firmes permeables, entendido como el tiempo necesario para que se genere flujo efluente en función de la intensidad de lluvia y de la condiciones de saturación del firme.
- Elaborar un modelo teórico de la capacidad de infiltración de una estructura completa de firme permeable, que permita la predicción del comportamiento real de cualquier sección con una determinada inclinación ante diferentes aportes de agua y de sedimentos.
- Desarrollar sistemas de limpieza y mantenimiento específicos para firmes permeables, adaptados a cada tipo de pavimento permeable de modo que aseguren la máxima recuperación posible de la capacidad de infiltración perdida.

Considerando como segundo aspecto el estudio de la durabilidad de los firmes permeables, desde el punto de vista de la capacidad portante y de los materiales de construcción empleados, los principales objetivos de investigación futuros son:

- Comprobar la durabilidad de los refuerzos de hormigón y de plástico empleados en la construcción de superficies de césped o grava reforzados, analizando factores como la aparición de tensiones de tracción o la resistencia a la radiación ultravioleta.
- Desarrollar nuevas metodologías de ensayo de la resistencia a los esfuerzos tangenciales producidos por maniobras de giro, aceleración y frenado sobre los pavimentos permeables: mezclas bituminosas porosas, adoquines, hormigón poroso y césped reforzado.
- Aplicar el hormigón poroso en diferentes capas de firmes permeables, con variaciones de aditivos y dosificaciones para mejorar las resistencias y evitar posibles afecciones de las sales empleadas en la conservación de carreteras.
- Desarrollar pavimentos permeables continuos bicapa o tricapa, con permeabilidades crecientes con la profundidad, empleando mezcla bituminosa porosa y hormigón poroso.
- Caracterizar nuevas capas granulares, estabilizadas o no, que ofrezcan una permeabilidad, capacidad portante y volumen de almacenamiento de agua adecuados para su aplicación en firmes permeables.
- Desarrollar secciones de firmes permeables para tráfico pesados, con pavimentos continuos reforzados con fibras o pavimentos discontinuos con sistemas de transmisión de carga especiales, sobre capas inferiores que aseguren una adecuada capacidad portante del conjunto.
- Elaborar un modelo teórico de la capacidad portante de una estructura completa de firme permeable, que permita el pronóstico de la durabilidad de cualquier sección ante diferentes solicitaciones de tráfico y afecciones de vertidos, con unas determinadas condiciones de la explanada.
- Desarrollar un catálogo de secciones de firmes permeables construidas con diferentes materiales y acabados, adaptadas a las distintas solicitaciones de tráfico y a los distintos tipos de explanadas posibles.

En resumen, el campo de investigación sobre firmes permeables es muy amplio y variado y esta tesis no ha hecho más que sentar unas bases que pueden ser aprovechadas para el desarrollo y la continuidad de esta técnica de construcción. Únicamente mediante la investigación continua será posible el perfeccionamiento de los firmes permeables y el mantenimiento de las múltiples ventajas que ofrecen a lo largo del tiempo.

EXTENDED ABSTRACT

Thesis title:

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

1 INTRODUCTION*1.1 FRAMEWORK AND OVERVIEW*

This thesis is part of a pioneer research project in Spain on pervious surfaces and their ability to degrade hydrocarbons: ‘Development of new structures of pavements for the biodegradation of hydrocarbons (FIDICA)’, reference REN 2003-05278/TECNO. This project is funded by the Spanish Education and Science Ministry and run by University of Cantabria with the collaboration of Coventry University, UK. This project is divided into two parts. One is focused on the physical features of the system: the building materials, bearing capacity and infiltration capacity performance. The second part of the project deals with the biological aspects: the microbiology of the hydrocarbon degradation, use of fertilizers, and pervious pavement performance on water quality depuration. This thesis is focused on the first part of this research project.

The document is divided in five chapters: introduction, literature review, methodologies, discussion of the results and conclusions. The introduction includes the framework of the reseach, the overview of the theis, the objectives and hypothesis. It includes some points about sustainable drainage, among which pervious pavements are. The second chapter is a literature review with respect to pervious pavements. It is focused on their main inconveniences: clogging and degradation. It is completed with the election of the permeable sections to be experimentally analysed. The third chapter presents the methodologies used in the pervious pavements tests, including the description of materials and equipments. The forth chapter is focused on the analysis and discussion of the results obtained from the different methodologies. Finally, the fifth chapter gathers the conclusions of the thesis. It includes the particular conclusions and the general conclusions. This final chapter is completed with the main future research lines to continue the work started with this thesis. This extended abstract summarises each of chapters, summing up the main points of the content.

1.2 OBJECTIVES AND HYPOTHESIS

The general objectives of this research are:

- Study the pervious pavements and propose new sections including recycled materials.
- Analyse in laboratory and in real application, the behaviour of the different sections of pervious pavements.
- Offer the main recommendations for the appropriate design and construction of permeable sections.

The particular objectives are:

- Carry out a complete state of the art that helps to identify the main problems related with pervious pavements.
- Synthesize the studies carried out to solve the main inconveniences associated to pervious pavements and select some specific sections for experimental analysis.
- Develop a laboratory test to characterize the clogging resistance of different pervious pavements.
- Develop a field test to give a diagnosis of the built pervious pavements.
- Ensure the correct durability of pervious pavements by means of the selection of the most appropriate construction materials in laboratory.
- Construct models and real parking bays with complete permeable sections registering basic parameters to characterize their functionality.
- Fix the most appropriate design approaches for pervious pavements from the experience of constructing the models.

The main hypothesis of this thesis is that pervious pavements have their main application in parking lots with light traffic. Other hypotheses are:

- The main inconvenience of pervious pavements is the surface clogging along time.
- Different types of pervious pavements can be compared because they have different infiltration capacities under the same conditions.
- The diagnosis of different types of pavements is possible by measuring their answer to different contributions of water.
- Pervious sections built with different materials will have different functionalities.

1.3 SUSTAINABLE DRAINAGE

Among the global trend of sustainable development, there are some new engineering solutions to complete the conventional urban drainage systems, improving the quality of water and minimizing the problems with quantity like flooding (Schueler, 1987; Field *et al.*, 2006a; Novotny, 2007). Around the world, there are many universities, public administrations and companies in the United Kingdom, France, Germany, United States or Australia which offer guidance and products related to sustainable drainage. This huge variety of solutions receives different names, being the four better known:

- Low Impact Development (LID).
- Water Sensitive Urban Design (WSUD).
- Best Management Practices (BMPs), specifically Stormwater BMPs.
- Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).

Among these main trends there are different classifications of the specific techniques. Some of the main ones are given by Temprano *et al.* (1996), Jiménez (1999), EPA (1999a), Environmental Alliance (2001), CIRIA (2001), Wilson *et al.* (2004) or Caltrans (2007). Table 1 presents a proposed classification as synthesis of the literature review. In this classification there are 12 techniques, three non-constructive and nine constructive, classified in 4 categories. Pervious pavements are part of the pervious surfaces as infiltration system.

Table 1. Classification proposed for the Sustainable Urban Drainage Systems.

Category	Technique
1. Preventive measures	1. Legislation
	2. Formation
	3. Inversion
2. Infiltration systems	4. Pervious surfaces
	5. Infiltration trenches and soakaways
	6. Infiltration basins
3. Catchment and transport systems	7. Filter drains
	8. Swales
	9. Filter strips
4. Passive treatment systems	10. Detention basins
	11. Retention basins
	12. Wetlands

2 LITERATURE REVIEW

2.1 PERVIOUS PAVEMENTS

Pervious pavements are an important subset of SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) and BMPs (Best Management Practices) (Pratt *et al.*, 2002). The main objective of pervious pavements is to collect and infiltrate runoff (Scholz *et al.* 2007). Pervious pavements are sections made up of several layers of construction materials that allow water to flow through them, from the surface till the foundation, offering the necessary bearing capacity to resist certain traffic.

Urban pavements are generally classified as impervious or pervious surfaces. Pervious pavements can be divided into permeable and porous pavements. Permeable pavements are surfaced with non-porous materials that filter through inlets or slots in the surface (Pratt, 1997), as for example permeable concrete block paving. Taking into account the discontinuity of this kind of permeable surfaces, reinforced grass or gravel could be included in this category. While, porous pavements offer continuous surface with a percentage of voids through which water infiltrates into the base layers. These pavements are for example porous asphalt or porous concrete. Besides, considering the final use of the water infiltrated, pervious pavements could be classified into three categories: direct infiltration to the subsoil, water storage in the subbase and deferred underground drainage to the sewer system.

The use of pervious pavements has a lot of advantages: reduce land consumption, preserve natural water balance at the site and improve the skid resistance of the surface, thus reducing hydroplaning (Schueler, 1987). In addition, they have a high removal capacity of soluble and fine particulate pollutants in urban runoff, as well as the possibility of allowing groundwater recharge and controlling stream bank erosion (Novotny and Olem 1994). But the use of pervious pavements has some limitations and inconveniences. Due to their filtration characteristics, pervious pavements with direct infiltration cannot be used in areas where hazardous substances are likely to be washed into the subsoil and areas of aquifer recharge. Furthermore, the use of pervious pavements may be restricted in cold or arid regions or regions with high wind erosion, due to the high risk of surface blockage, which is often a reason for failure (EPA, 1999b; Schlüter and Jefferies, 2001; Ferguson, 2005). Besides, pervious pavements are mainly used in light traffic parking areas (Smith and Burak, 2004) and depending on the materials they can present different problems, such as the degradation of porous asphalt by the action of the hydrocarbons leakage (Pérez Jiménez *et al.*, 1982; Tomás Raz, 1993).

2.2 CLOGGING

In normal circumstances, the most common factor causing failure of pervious surfaces is clogging. Clogging can be defined as the accumulation of silt within the pavement structure due to sedimentation, thus reducing its filtering capacity (Dierkes *et al.*, 2002; Pratt *et al.*, 2002; Scholz *et al.* 2007; Brattebo *et al.* 2003; Davies *et al.*, 2002). This blockage of the pavement is most likely to occur in the surface and in the geotextile layers, if these are used (Rommel *et al.*, 2001). The quantity and type of silt can greatly vary depending on factors such as: prevailing wind, water erosion, type of soils in the area (clay silt, lime, silica, etc) or surrounding uses of land (building site, industrial areas, commercial areas, etc.). Some pervious pavements could become clogged in three years (Scholz *et al.* 2007) but other could maintain their infiltration capacity for over six years (Brattebo *et al.* 2003) or more.

There are many studies about clogging in permeable pavements, both in laboratory and in field. In laboratory the simulation of the rain is commonly used to test the infiltration capacity of any surface (Gerke, 1982; Johnston *et al.*, 1984; Shackel, 1997; Dierkes *et al.*, 2002; Davies *et al.*, 2002; de Solminihac *et al.*, 2002; Castro *et al.*, 2006). Applied to permeable pavements, University of South Australia (Rommel *et al.*, 2001) and Coventry University (Davies *et al.*, 2002) develop clogging tests in laboratory with rain simulations, both over Formpave paving stones. In field, portable infiltrometers, sometimes called permeameters, are used for the in-situ measurement of the infiltration capacity of any surface: flooding or ring infiltrometers that use a column of water, constant or variable, over the surface, and infiltrometers that use rain simulation of any kind over the test area. Among the flooding type infiltrometers, the most usual employ a ring with a variable water column inside. Examples of these are the LCS Permeameter (CEDEX, 2000), the one described in the European Standard EN 12697-40 (2005) or the one used in China by Tan *et al.* (2000) and Tan *et al.* (2002). Their main inconvenience is that results strongly depend on the conditions of the point under test: cracks, fissures, moisture and temperature (Gerke, 1984). The double-ring infiltrometer (ASTM, 2003) tries to correct these problems by testing a larger area, fixing the surrounding conditions. It has been successfully used for soil hydrological studies and for pervious pavement assessment (Bean *et al.*, 2004). However, this test could give higher infiltration values due to the constant water head maintained on the surface during the observation period and the absence of raindrop impact effects (Bhardwaj and Singh, 1992). To simulate the rain, the Zarauz Permeameter just allows water to spill onto the pavement from a known height, freely filtering over it (de Solminihac *et al.* 2002). However, this kind of direct water pouring does not properly represent the raindrop impact effect, which has been proved to be an important factor affecting the infiltration process (Bhardwaj and Singh, 1992).

2.3 DEGRADATION

The bearing capacity of a pavement depends on the construction materials used, their size and layout, the layers thickness and the quality of the underlying soils (Pérez *et al.*, 1982). Water action decreases the bearing capacity of the pavements affecting the properties of this construction materials and subsoils (Hinojosa Cabrera, 2004; Parrilla Alcaide *et al.*, 2005). Besides, the main solicitation of the pavements is due to traffic load (Kraemer *et al.*, 2004). However, permeable pavements are designed to manage with water and they are supposed to be restricted to light traffic areas, overall in parking areas. In these areas there are hydrocarbon leakages, which are controlled by the pervious pavements to protect water quality (Coupe *et al.*, 2003; Bayón *et al.* 2005; Newman *et al.*, 2006). But, amongst the different sorts of permeable surfaces, one can be affected and degradate by the spills coming from vehicles: asphalt (Tomás Raz, 1993; Páez Dueñas, 2005; Pérez Jimeno *et al.*, 1982; Tomás Raz, 1993).

In the last years, the main asphalt and construction companies started to work with fuel-resistant bitumen obtained through the addition of polymers, insoluble load or chemical reactives (Páez Dueñas, 2005). In 1995, the Dutch company Ooms Avenhorn Holding developed bitumen modified with polymers resistant to fuel flows (PMA JR) to be used in the Kuala Lumpur airport. Up to date, this bitumen has successfully been applied in 5 airports all over the world, standing out La Guardia airport in U.S.A. in 2002 (Corun *et al.*, 2006). Similarly, Repsol YPF develops, with the latest available technology, the fuel-resistant bitumen BAC 35/50, that shows an excellent behaviour in front of the damage from the most commonly used carburants (Páez Dueñas, 2005; Repsol YPF, 2007).

Due to the lack of standardised tests to check asphalt resistance to the hydrocarbon action, McBee and Sullivan (1977) developed two test types to compare the damage to diverse binder agents: immersion in fuel during 8 hours and dripping over the test-tube of 600ml fuel. In both tests, loss of mass and stability were evaluated in three Marshall test-tubes for each assumption. The immersion technique simulates a massive fuel flow above an impervious pavement, while the dripping technique simulates the most common flow in parking areas. Moreover, the immersion in fuel and subsequent evaluation of mass loss does not let assess the changes inside the asphalt. That is why Corun *et al.* (2006) adopted the test developed by Buijs and Van Buël in 2001. In this test only one side of the test tube is immersed in fuel an after it is brushed for two minutes with a steel brush. Marshall Stability or Cantabrian test (NLT-352/00, 2000) has been used too to evaluate the differences. With the aim to agree on criteria, recently the norm UNE-EN 12697-43 (2006) has been enforced. However, neither these new bitumens nor these tests have been applied to porous asphalt to date.

2.4 PERMEABLE SECTIONS

The election of the permeable sections object of this research was made taking into account the previous experiences in Australia (Rankin y Ball, 2004); Brazil (Acioli *et al.*, 2004, Acioli *et al.*, 2005); Chile (de Solminihac y Castro, 2002; Fernández *et al.*, 2003); France (Raimbault *et al.*, 1985; Goacolou, 1993; Pagotto *et al.*, 1999); Germany (Dierkes *et al.*, 2002; Fach *et al.*, 2002); Spain (del Val Melús, 1990); Sweden (Hogland *et al.*, 1987); United Kingdom (Pratt *et al.*, 1989; Pratt *et al.*, 1995; Pratt, 1999b; Bray, 2001; Schlüter and Jefferies, 2001; Abbott *et al.*, 2003) and United States (Brattebo and Booth, 2003; Collins *et al.*, 2006). Also, several Spanish catalogues of sections were considered as reference (Manchón *et al.* 2000; Instrucción de carreteras, 2003; Euroadoquín, 2004).

Two pervious surfaces were elected to represent permeable pavements (non-continuous) and porous pavements (continuous):

- Concrete blocks: they are not used as permeable surface in Spain at the moment, except in punctual cases with separators or a special arrangement.
- Porous asphalt: it is commonly used in roads for draining the surface and making it safer for traffic, but always over an impermeable layer.

Dealing with the construction materials used in the base and sub-base of the pavement, two possibilities of aggregates were considered:

- Recycled aggregates: they are crushed in a recycling plant from construction debris, so they present a wide range of materials as concrete or ceramic.
- Limestone aggregates: they are the common aggregate used in base and sub-base in Cantabria (north of Spain) and the most economical.

The four combinations of these elections are shown in Table 2. The sections are completed with geotextiles as separation and filter, and plastic cells for the bottom as drainage.

Table 2. Permeable sections elected to the experimental analysis.

Reference	Surface	Base layers
BA	Concrete Blocks	Limestone Aggregates
BR	Concrete Blocks	Recycled Aggregates
PA	Porous Asphalt	Limestone Aggregates
PR	Porous Asphalt	Recycled Aggregates

3 METHODOLOGIES

3.1 TEST OF INFILTRATION CAPACITY IN LABORATORY

The Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI), shown in Figure 1, is based on the infiltrometer used by Davies *et al.* (2002) to measure the infiltration of surface runoff through permeable pavements made with concrete blocks. The main innovation of the CFI respect to the previous equipment is that it not only allows the simulation of surface runoff, but also the simulation of direct rainfall over the tested surface.

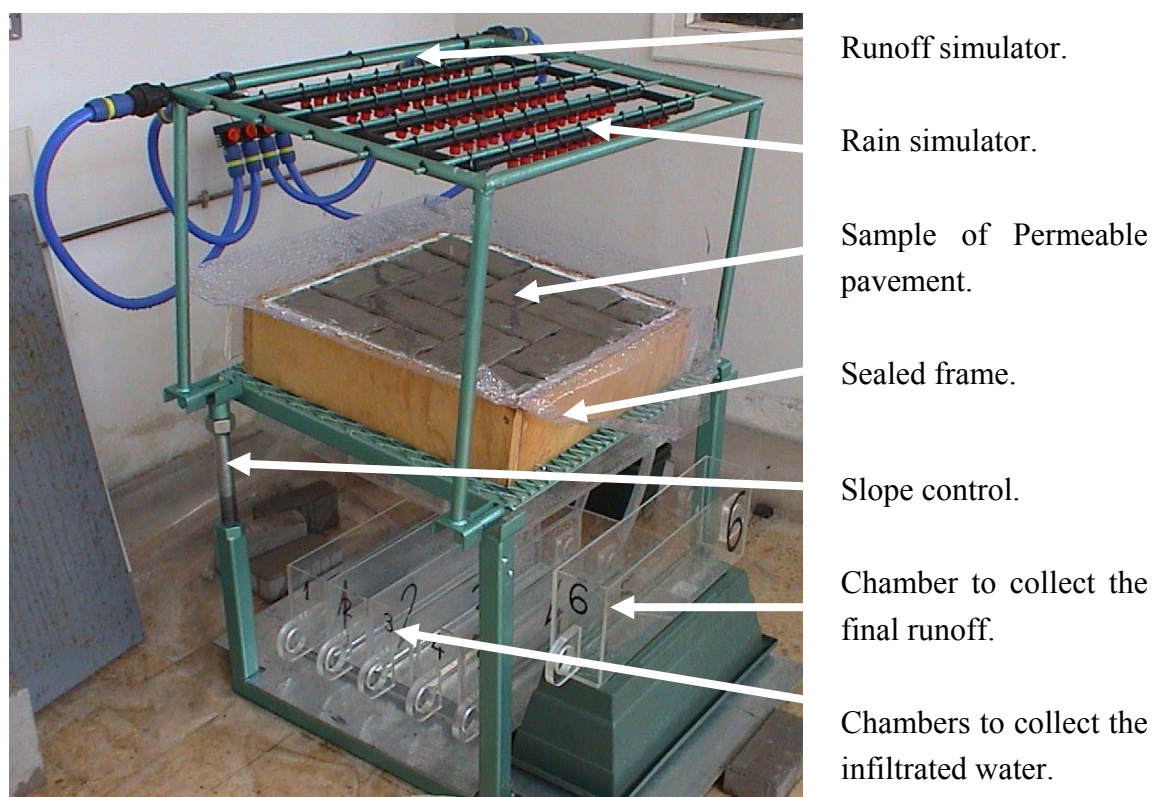


Figure 1. Cantabrian Fixed Infiltrometer (CFI).

The CFI tests of square pieces of permeable pavements of 50cm side, varying the clogging state and the slope of the tested pavement. Thanks to the six chambers placed in the lower part of the equipment, it is possible to analyse the effects of the silt and slope in the amount of the infiltrated water. Of these six chambers, five are situated just below the sample and they are used to collect the infiltrated water every 10cm of pervious pavement. The sixth chamber is placed at the end of the surface and it collects the residual runoff after the 50cm of pervious sample.

The samples of pervious pavement were made with the following layers:

- Geotextile: polyester nonwoven with a mass of 150g/m^2 and a water permeability flow rate of $110\text{l/m}^2\text{s}$.
- Bedding layer or base: 50 mm of limestone aggregate with particle size between 4mm and 6.35mm.
- Pervious surface: 80mm concrete blocks with four different geometries for the first experience and 100mm concrete blocks or porous asphalt for the second.

For the first experience with the CFI, four differently shaped slotted concrete blocks were tested (Figure 2). All of them were rectangular of 20cm x 10cm, with 8cm high and six equal slots in the perimeter. Comparing the four, the slots had different shapes but they result in the same free infiltration area: 6.0cm^2 .

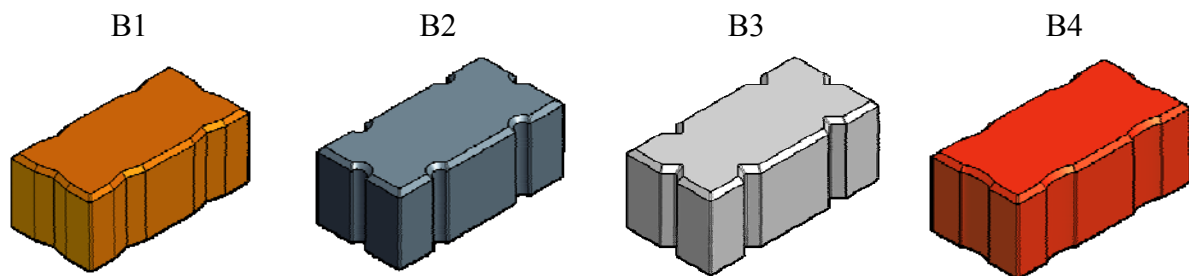


Figure 2. Concrete blocks with the four different geometries to compare.

For the second experience with the CFI, two different surfaces were tested for comparison: selected concrete blocks and porous asphalt. The blocks tested were rectangular of 20cm x 10cm with 10cm high. They had six elliptical vertical slots, which offer 6.0 cm^2 of free infiltration area for each block. These blocks are fabricated by Bloques Montserrat. While, the porous asphalt had an average voids percentage measured geometrically of 29.4%. It was tested using six square slabs of 50cm side and 10cm high, compacting them in laboratory after a second warming of the mixture fabricated in plant.

After placing the geotextile, base and pervious surface, the perimeter of the model was sealed to avoid infiltration in the borders next to the wooden frame. Once the sealant had hardened, the sample was prepared for adding the silt load to simulate the different clogging scenarios. The silt selected for the tests was crushed construction debris containing concrete, bricks, glass, metal and wood, with an organic matter content of 3%, by the potassium dichromate method, and 5% by ignition loss of material under 2mm diameter. The size distribution was similar to the used by Davies *et al.* (2002), which is shown in Figure 3.

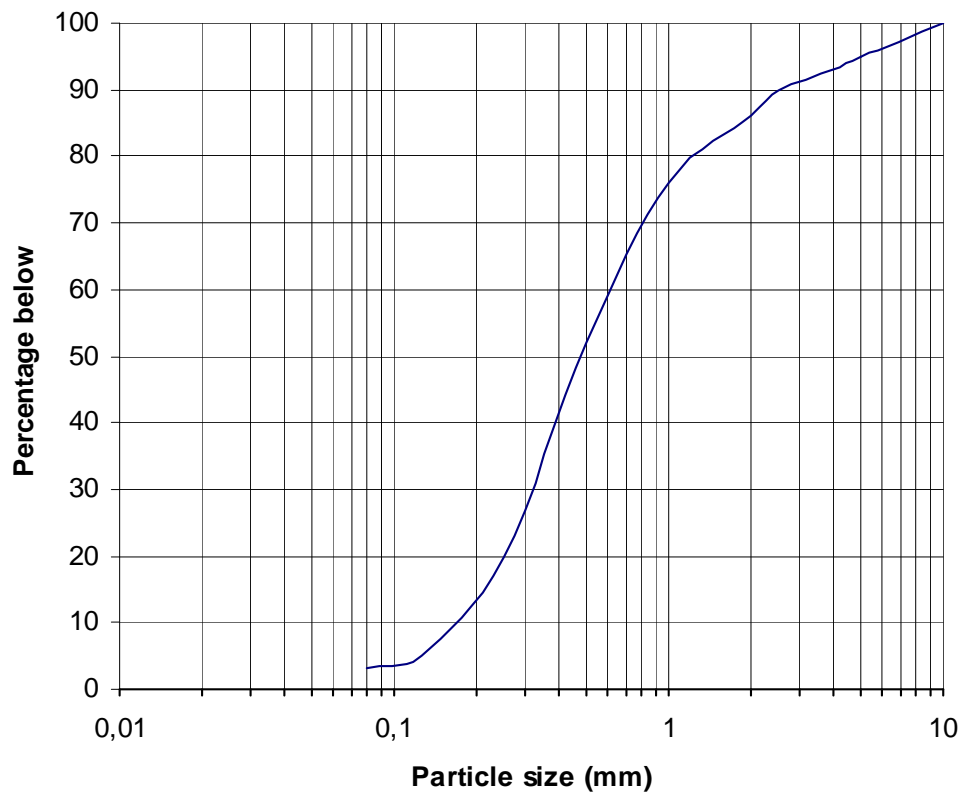


Figure 3. Particle size distribution of the silt applied to simulate clogging.

With the four geometries of concrete blocks, the blockage scenarios simulated were:

- Scenario 1: New pavement.
- Scenario 2: Semi-clogged. (2 kg/m² of silt).
- Scenario 3: Completely clogged (different loads).

With the concrete blocks with elliptical slots, the clogging scenarios were:

- Scenario 1: New pavement.
- Scenario 2: Semi-clogged. (2 kg/m² of silt).
- Scenario 3: Clogged (4 kg/m² of silt).
- Scenario 4: Completely clogged (5 kg/m² of silt).
- Scenario 5: Completely clogged with maintenance (less than 5 kg/m² of silt).

With the porous asphalt, the blockage scenarios were:

- Scenario 1: New pavement.
- Scenario 2: Completely clogged (2 kg/m²).
- Scenario 3: Completely clogged with maintenance (less than 2 kg/m²).

For all the surfaces made of concrete blocks, the method of silt application was the same: introducing silt into the gaps and hand-compacting it slightly in a single operation. To

clog completely the surface all the joints were filled with silt too. For the porous asphalt, the complete clogging was simulated filling up the voids with silt and hand compacting it (Figure 4). In both cases the scenarios of maintenance were simulated by a light brushing, taking away the excess of sediment and weighting it. The tested slopes for the comparison of the four geometries of concrete blocks were four: 0%, 2%, 5% and 10%. While, for the comparison of the two pervious surfaces, the gradients tested were five, because of the addition of a slope of 8% to know better the response with high slopes.



Figure 4. Pervious pavements of concrete blocks and porous asphalt completely clogged.

Each rain event simulated lasted 30 minutes in all cases. Runoff was simulated by one perforated pipe at the top of the sample and the volume provided corresponded to an impervious area of 0.25m^2 . The direct rainfall simulation was produced by five lines of sprinklers over the sample. In the first experience, the runoff and rain simulated were the corresponding to an intensity between 50 mm/h and 70 mm/h, with frequencies of every 15 and 100 years, respectively, in Santander, north of Spain. For the second experience, these intensities were adjusted between 45 mm/h and 55 mm/h, with frequencies of every 10 and 20 years, respectively, in Santander.

The ten first minutes of simulated rain were used to wet the sample. Afterwards, the measurement period began. For the first experience, this time was composed of 20 minutes of rain followed by 10 minutes of no rain, draining water into the chambers. For the second experience, the measurement time was only 20 minutes of rain, to compare directly the infiltration capacity without any extra drainage time. The volumes of water collected in the six chambers during this measurement period were the results for each silt load and slope of tested with the pervious sample. Temperature was around 20°C and humidity around 75% in all cases.

3.2 TESTS OF INFILTRATION CAPACITY IN FIELD

Two apparatus were used to test the infiltration capacity in field (Figure 5):

- LCS Permeameter: it is detailed in the Spanish standard NLT-327/00 (2000), and it is similar to the ring permeameter described in the European standard EN 12697-40 (2005).
- Cantabrian Portable Infiltrometer (CPI): it was designed especially for this study and it is made up of four main parts: flooding chamber, rain simulator, charging chamber and recharging recipient.

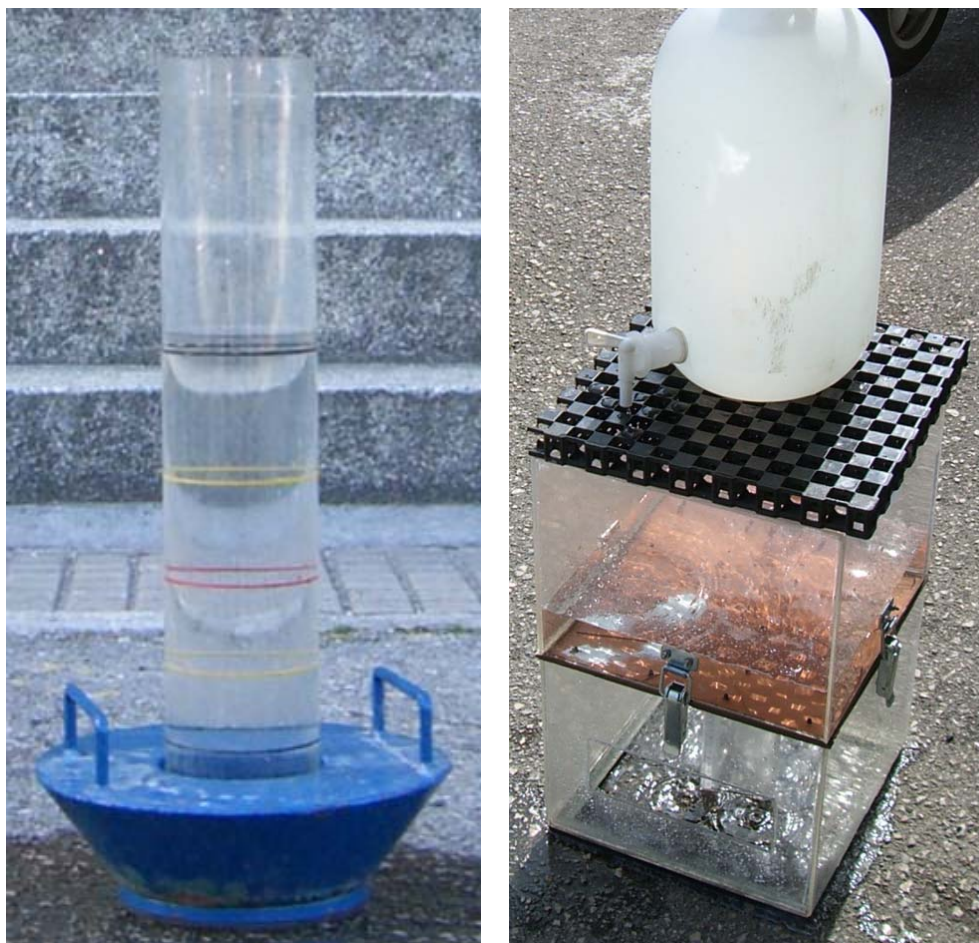


Figure 5. LCS permeameter and Cantabrian Portable Infiltrometer (CPI).

Several impervious and pervious pavements were selected to be tested with the LCS Permeameter and the CPI. Table 3 shows the reference and details of each pavement tested. All of them were located in two urban areas: Santander and Gijón, both located in the north of Spain.

Table 3. Tested pavements.

Reference	Description	Location	Year of installation
RG1	Grass reinforced with concrete cells (clayey soil)	Civil Engineering School, Santander	2005
RG2	Grass reinforced with plastic cells (sandy soil)	La Guía Car Park, Gijón.	2005
A1	Impervious asphalt (new surface course)	Las Llamas Park, Santander	2007
A2	Impervious asphalt (old surface course)	Civil Engineering School, Santander	1997
PA1	Porous asphalt (road with high traffic intensity)	Liencres Road, Santander	2006
PA2	Porous asphalt (car park with light use)	La Guía Car Park, Gijón.	2005
B1	Concrete blocks (sealed with mortar in the joints)	Sardinero Car Park, Santander	2001
B2	Concrete blocks (without any filler in the joints)	La Guía Car Park, Gijón.	2004

The infiltration tests with the LCS Permeameter were carried out according to the procedure indicated in the standard NLT-327/00 (2000). This procedure comprised:

- Placing the permeameter over the selected point, situating the load and the plug, filling the methacrylate pipe with water.
- Allowing the permeameter to completely empty onto the pavement in order to saturate the surface.
- Plugging and filling the methacrylate pipe with water again.
- Allowing the permeameter to empty, noting down the time in seconds from the moment the water level passes the higher mark till it reaches the lower mark.

This procedure was followed at 3 different points for each of the tested surfaces. Apart from the rubber situated in the device contact with the surface, no agent was used to ensure the complete base sealing. Some leakage was observed working with irregular surfaces. With impervious surfaces, point 4 was limited to half an hour (1800 seconds), considering the surface impervious over this time.

The CPI needed prior calibration in the laboratory to know the water height in the charging chamber that produces specific rain intensities over the test surface. After this, the proposed infiltration test using the CPI followed these steps:

- Determine the rain intensities to be simulated according to the location and return periods to test.
- Place the device over the selected area and seal the perimeter with Vaseline.
- Pour three litres of water directly inside the flooding chamber to check the perimeter sealing, letting the water infiltrate in order to saturate the surface.
- Place the rain simulator needed to simulate the corresponding rain intensity and fill the charging chamber up to the specific water height.
- Maintain the water height constant in the charging chamber for five minutes adding the water needed from the recharging recipient, noting down the water level inside the flooding chamber at the end.

This procedure was carried out at three areas for each of the tested surfaces and these areas included the point tested with the LCS Permeameter. Three rain intensities were selected as reference, corresponding to rains of 5 minute duration and return periods of 10, 50 and 500 years. Table 4 shows the rain reference intensities, obtained using the Spanish Surface Drainage Instructions (Dirección General de Carreteras, 1990) and the Maximum Daily Rain Intensities (Dirección General de Carreteras, 1999)

Table 4. Rain intensities of 5 minute duration and return periods of 10, 50 and 500 years.

Location	Rain intensities with 5 minutes duration (mm/h)		
	T=10 years	T=50 years	T=500 years
Santander	109.50	152.61	224.84
Gijón	92.03	126.98	182.90

The calibration of this test finished with the measurement of the flooding heights produced over a flat metallic plate. The average was 2.3cm for T=10 years; 2.7cm for T=10 years and 3.6cm for T=10 years. These high flooding heights result from the volume introduced inside the flooding chamber to improve the measurement and from some increases in the intensity simulated. They will be taken as reference of the results corresponding to a completed impervious surface.

3.3 TESTS OF POROUS ASPHALT RESISTANCE TO HYDROCARBONS LEAKAGES

Porous asphalts fabricated with three kinds of bitumen were compared:

- Conventional bitumen B 60/70.
- Bitumen modified with polymers BM-3b.
- Fuel-resistant bitumen BAC.

The Spanish Ministry of Public Works and Town Planning (MOPU, 1987) stated that the bitumen required for manufacturing porous bituminous mixes was B 60/70, being it possible to use bitumen improved by addition of elastomers. With these modified bitumens it is possible to achieve higher resistance to disintegration with high voids rate. This is the case of the modified bitumen BM-3b, nowadays employed in most cases to manufacture porous bituminous mixes in Spain. In its turn, the fuel-resistant bitumen BAC fulfills the specifications of a bitumen BM-2, less modified than the BM-3b (Páez Dueñas, 2005).

Dosage for each of the three kinds of bitumen has been the same in all cases: 4.5%. This is the minimum recommended by the PG-3 (2007). The aggregates were ophite with 2746kg/m³ density, adjusted to the PA-12 particle size (Table 5) with 4% cement as filler (particles under 0.063mm).

Table 5. Particle size of the porous asphalt aggregates: PA-12 (PG-3, 2007).

Particle size	Percentage passing (%) each UNE sieve (mm)						
	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
PA-12	100	70-100	38-62	13-27	9-20	5-12	3-6

The porous bituminous main three characteristics are (Pérez y Calzada, 1990):

- Void rate.
- Permeability.
- Resistance to degradation.

In this study, the void rate was measured geometrically according to NLT-168/90 (1990). Permeability was measured through a variable load permeameter in laboratory (Calzada, 1984). Loss by disintegration was measured employing the Cantabrian test of abrasion loss (NLT-352/00, 2000). The averages were 20.3% of void percentage and 0.26cm/s of permeability. The analysis of loss by disintegration was done in 36 specimen test-tubes, 12 per bitumen type. Average disintegration values at 20°C were: 21% for bitumen B 60/70; 12% for bitumen BM-3b and 20% for bitumen BAC. The porous asphalt fabricated with BM-3b

offered a significantly better result with less percentage of mass lost by the Cantabrian Test.

The amount of hydrocarbon settled on urban surfaces derived from concentrations found in surface runoffs has an average value of 178mg/m²/week (Pratt *et al.*, 1999). This value was taken as a reference for the hydrocarbon leakages simulation. The Marshall test-tubes flat surface is 81 cm², so it may be calculated that the theoretical amount of hydrocarbon is 6.18 mg/month. The droppers used to simulate the hydrocarbon leakage give an average of 22.6 mg of hydrocarbon per drop, so the simulated leakage levels may be classified into the 5 categories shown in Table 6. The hydrocarbon leakage was completed with a rainfall simulation with a total volumen of 824ml of distillate water, corresponding to the proportional monthly distribution of the average annual rainfall in Santander, Cantabria: 1246 mm (INM, 2001).

Table 6. Levels simulated of hydrocarbon leakages.

Leakage	Total added hydrocarbon		Equivalent time (months)
	(drops)	(mg)	
Level 0	0	0.0	0
Level 1	12	271.1	43.8
Level 2	36	813.6	131.6
Level 3	60	1356.0	219.4
Level 4	84	1898.4	307.2
Level 5	108	2440.8	395.0

Since the beginning, the full immersion test was discarded for porous bituminous mixtures for the following reasons:

- With motor oil and porous asphalt it is nonsense to perform the test because the high viscosity of the oil causes an increase of the test tube mass instead of loss.
- With fuels the porous asphalt is completely deteriorated because of the penetration inside the test tube after a complete immersion.
- It does not represent the real situation because the porous asphalt used in pervious pavement is never in long and complete contact with any kind of oil or fuel.

Thus, the proposed methodologies to evaluate the hydrocarbon leakage action on the porous asphalt were two, trying to regulate the effect:

- Run-off test.
- Semi-immersion test

In the run-off test, the test-tubes are placed in stands that let them drain after flows.

Firstly, a drop-by-drop flow of the fixed hydrocarbon amount, followed by the corresponding rain simulation, also drop-by-drop. After this, there is a run-off period of seven days. During this period hydrocarbon and water have time to pass through the porous asphalt. The process is repeated four times throughout 28 days. In the end, the test-tubes are taken out of the stands and maintained at 20°C for at least 24 hours before breakage according to the Cantabrian test. Leakage simulations were carried out with used oil because it is the most frequent leakage in parking lots. In all, 156 test-tubes were tested with the proposed run-off methodology: 60 test-tubes with bitumen B 60/70; 48 with bitumen BM-3b and 48 with bitumen BAC (Figure 6).

In the semi-immersion test, the test-tubes are located at the bottom of a watertight container in direct contact with hydrocarbons and water. During two days, they receive four flows through dripping. Each flow is composed of a fixed hydrocarbon amount and the corresponding volume of distillate water, as rain simulation. Afterwards, the semi-immersion period takes three days during which the porous mixture is half submerged in water and the accumulated hydrocarbon till the medium test-tube level: 3.5 to 4.0 cm depth. Finally, the examination is carried out extracting the test-tubes from the water and storing them for at least 24 hours at 20°C before breakage according to the Cantabrian test. The semi-immersion test was used to compare the effect of three types of hydrocarbon leakages: oil, fuel and gasoil. In all, 57 Marshall test-tubes were tested: 11 test-tubes with bitumen B 60/70; 23 with bitumen BM-3b and 23 with bitumen BAC (Figure 6).



Figure 6. Run-off and semi-immersion methodologies.

3.4 TEST OF PERMEABLE PAVEMENTS FUNCTIONALITY

Three experimental areas were built. The first experimental area, constituted by 16 models with 0.05 m² of occupation in plant, was built inside the new laboratory of permeable pavements for the biodegradation of hydrocarbons (FIDICA) of the University of Cantabria. This laboratory is located inside the Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Civil Engineering School) in Santander. The second experimental area, constituted by 16 models with 0.77 m² of occupation in plant, was executed in the university Campus of Santander. Lastly, the third experimental area, constituted by 15 models with 12.5 m² of occupation in plant, was built in the public parking lot near La Guía Sport Palace in Gijón, thanks to the city council collaboration (Table 7).

Table 7. Permeable sections constructed in the experimental areas.

Permeable section	Experimental area		
	Laboratory	Campus	Gijón
<i>BA</i>	4 models	4 models	3 models
concrete Blocks	10+5+G1	8+5+G1	10+5+G1
limestone Aggregates	25+G2+PC	25+G2+PC	25-35+G3+PC
<i>BR</i>	4 models	4 models	3 models
concrete Blocks	10+5+G1	8+5+G1	10+5+G1
Recycled aggregates	25+G2+PC	25+G2+PC	25-35+G3+PC
<i>PA</i>	4 models	4 models	3 models
Porous asphalt	10+5+G1	10+5+G1	10+5+G1
limestone Aggregates	25+G2+PC	25+G2+PC	25-35+G3+PC
<i>PR</i>	4 models	4 models	3 models
Porous asphalt	10+5+G1	10+5+G1	10+5+G1
Recycled aggregates	25+G2+PC	25+G2+PC	25-35+G3+PC
<i>Reinforced Grass</i>	-	-	3 models

For the construction of the sections type BA and BR in the laboratory and in the parking area of Gijón, the used paving stones were Blocks Montserrat (10cm high). For the case of the models of the Campus of Santander the blocks used were Formpave Aquaflo (8cm high). In the three cases, the blocks were placed over 5cm of a bedding layer of limestone with size 4-8mm. On the other hand, for the construction of the sections type PA and PR, the porous asphalt layer had 10cm of thickness with a voids percentage of 20% in the laboratory; 22% in the Campus and 25% in Gijón. It was laid over 5cm of base. In all the cases base and subbase were separated using a geotextile with filter properties: Polifelt TS-30.

Regarding the granular materials used in the subbases, the particle size of the limestone and recycled aggregates is shown in Table 8. All of them are highly permeable and characterized by their continuous grain without fine. The main difference in size is that the recycled aggregates have higher percentage of fine particles. For drainage at the bottom of the permeable section plastic cells with geotextile recover were set. The plastic cells were 53 mm high, manufactured with high density polyethylene by Atlantis.

Table 8. Particle size of the subbase materials.

Material	Percentage passing (%) each UNE sieve (mm)						
	40	25	20	12.5	8	4	2
Limestone aggregates	100	80-100	60-90	34-60	10-32	0-3	0-1
Recycled aggregates	100	90-100	75-94	48-80	28-58	2-16	0-5

To evaluate the functionality of the permeable sections, it is fundamental to know the water input that allows the characterization of the behaviour of the permeable section. This contribution of water or rainfall can be natural or simulated. The natural rainfalls have only been considered in the experimental location of Gijón, having the data of hourly precipitation provided by the meteorological station of Gijón (given by the State Agency of Meteorology). The simulated precipitations were used in the three locations because they offer advantages of flexibility and control (Table 9).

Table 9. Characteristics of the simulated precipitations.

Location	Amount of water poured (l)	Pouring area (m ²)	Pouring time (min)	Simulated flow (mm/h)
Laboratory	2.50	0.05	60	50
Campus	1.25	0.05	1	1500
Gijón	25.00	1,00	1	1500

In the laboratory, the reference for the simulated rain was the annual average precipitation registered in Santander in the period 1971-2000 of 1246 mm (INM, 2001). The simulation in laboratory was carried out with droppers every two weeks during one hour. The intensity was 50 liters per square meter, obtaining an annual precipitation of 1300 mm, lightly above the marked reference. On the models situated in the Campus and in Gijón, rain simulation was carried out by pouring directly a known quantity of water in a fixed area for a specific time. In both cases, the flow selected for the simulation was the same one: 1500 mm/h. This intensity 30 times superior to the one used in laboratory makes sure a quick

response of the pervious pavement giving information about the worst reaction. The number of rain simulations monitored was: 37 in the laboratory, 4 in the Campus and 10 in Gijón. Besides, 9 natural precipitations were monitored in the experimental car park in Gijón.

The permeable hydraulic behaviour of pervious pavements presents a great complexity due to the heterogeneity of the construction materials that compose its different layers. However, it is possible to measure basic parameters to assess their functionality. The methodology of rehearsal proposed requires two measures: pervious pavement reaction time and effluent response along time. Pervious pavement reaction time is the interval from the moment when the contribution of water on the surface begins, and the moment when the appearance of effluent flow is detected in the lowest part of the permeable section. Effluent response along time is the evolution of the accumulated output volume starting from the reaction. For the evaluation of the time of reaction, a chronometer was used for rain simulations, and the references of time in hours for natural rains. While, to obtain the series of effluent volume along time five pluviometers were used: four pluviometers without data-logger and one with data-logger. The first four were Oregon Scientific RGR122 pluviometers with a sensitivity of 45 seconds and 7-8 millilitres. They were used to simultaneously evaluate several replicas of pervious pavements during rain simulations. The pluviometer with data-logger was part of a meteorological station Oregon Scientific WMR928NX with Date-Pak of SkyView Systems. It was only used in the experimental location of Gijón to monitor natural rains. In the three locations, it was supposed that the input of water is distributed in retained volume and effluent volume.



Figure 7. Laboratory equipment to evaluate the pervious pavement functionality.

4 DISCUSSION OF THE RESULTS

4.1 INFILTRATION CAPACITY IN LABORATORY: DIFFERENT CONCRETE BLOCK GEOMETRIES

The selected geometry was the one with elliptical slots (Figure 8). The following conclusions are extracted from the discussion of the results obtained of the clogging resistance with different geometries of paving stones with spaces:

- The infiltration capacity diminishes when increasing silt load, blocking the available spaces for the infiltration, and when increasing the inclination of the surface, reducing the time of retention of the water in a point that allows the infiltration in this point.
- A silt load of 2.0kg/m^2 has a harmful effect on the infiltration capacity of a permeable pavement with concrete blocks of 8cm of thickness, but the reduction is not critical in any of the geometries tested.
- The necessary silt loads to simulate clogging are directly related to the geometry of the spaces due to its influence in the particle size and arrangement inside the holes.
- The geometries of paving stones with better results are those that offer longer and narrower spaces for the infiltration, acting like a sieve, avoiding the entrance of particles of great size and offering bigger capacity to receive fine silt, not getting blocked until silt loads of 3.4kg/m^2 .
- The clogging resistance test with the Fixed Cantabrian Infiltrometer (FCI) allows the selection among geometries of paving stones, comparing the infiltration average with a load of silt of 2.0 kg/m^2 , and the reference of the silt quantity used to simulate the maximum blockage.
- For all tested geometries of concrete blocks, the minimum infiltration percentages are 91% without silt; 79% with a silt load of $2,0\text{kg/m}^2$, and 17% with maximum blockage, all them for a slope surface of 10%.
- The design of the paving stones for permeable pavements should not only consider clogging resistance, but also all the parameters of characterization of the concrete blocks, including durability and amenity.



Figure 8. Selected concrete block geometry.

4.2 INFILTRATION CAPACITY IN LABORATORY: CONCRETE BLOCKS AND POROUS ASPHALT

Table 10 presents the regression of infiltration (I) with distance (d), silt load (s) and surface inclination (i). The following points are extracted from the discussion of the obtained results from the clogging resistance tests of concrete blocks and porous porous asphalt:

- With the pavements without silt, concrete blocks with spaces have better infiltration capacity with an even surface, while the porous asphalt offers better behaviour when increasing inclination, being the minimum infiltration percentages of 84% for the paving stones and of 87% for the porous bituminous mixture, both with 10% of inclination.
- With clogged pavements, the concrete blocks with a silt load of 5kg/m², present a minimum infiltration percentage of 9%, while the porous bituminous mixture, with a load of silt of 2kg/m², infiltrates 76%, both values with a 10% slope.
- For both surfaces, a slight load of silts offers a beneficial effect, retaining the flow of runoff and improving the infiltration through the surface, whenever the silts are not compacted and blocking the available holes.
- The maximum drainage longitude, as the distance where the maximum infiltration takes place, increases when increasing the inclination or the load of silts until surpassing the 50cm in the cases of minimum infiltration capacity.
- The states of the permeable pavements can be divided into two categories:
 - Category A: good infiltration capacity, paving stones with spaces with silt load until 4kg/m² and porous asphalt up to 1kg/m².
 - Category B: bad infiltration capacity, paving stones with silt load around 5kg/m² and porous asphalt with around 2kg/m².
- The superficial sweeping of a completely clogged pavement of concrete blocks is not enough to recover the infiltration capacity, because silt is compacted inside holes with a depth of 10 cm. While, applied to a porous bituminous mixture it is enough to maintain a good infiltration capacity along time.
- To assess which type of permeable pavements is the most appropriate for a particular application, other factors must be considered, such as for example the demanded aesthetic and economic requirements.

Table 10. Regression for the results with the ICF.

Pervious pavement	Relation	Coefficient of determination
Concrete blocks	$I=24.234 \cdot \ln(d) - 1.795 \cdot s^2 - 4.004 \cdot i$	$R^2=0.860$
Porous asphalt	$I=23.403 \cdot \ln(d) - 5.095 \cdot s^2 - 4.749 \cdot i$	$R^2=0.860$

4.3 INFILTRATION CAPACITY IN FIELD OF DIFFERENT PAVEMENTS

The following conclusions are extracted from the application of the permeameter LCS and PCI to different types of urban pavements:

- The LCS helps to analyze the infiltration capacity of specific points on continuous surfaces, identifying the impervious points and the state of blockage of surfaces like porous asphalt. But it does not offer representative results for discontinuous surfaces as reinforced grass, since the test methodology is not adapted to this type of irregular surfaces.
- The test methodology with the LCS, which analyzes only one point of the pavement, is quicker and easier than the one with the PCI, which analyzes a certain area of the pavement.
- The PCI helps to analyze the infiltration capacity of specific areas of any type of surface, continuous or discontinuous, identifying impervious and pervious areas in surfaces of porous asphalt, concrete blocks or reinforced grass (Figure 9).
- A permeable pavement, porous asphalt or concrete blocks with spaces, under good conservation conditions, ensures a height of flood of 0cm in front of a rain lasting 5 minutes and a return period of 500 years, while an impervious pavement presents a height of flood of 3.5cm.
- The results obtained from the PCI can be used to evaluate the correct performance of permeable pavements, supporting design, construction and maintenance decisions, adapting the pervious pavements to the rain regime of each location.

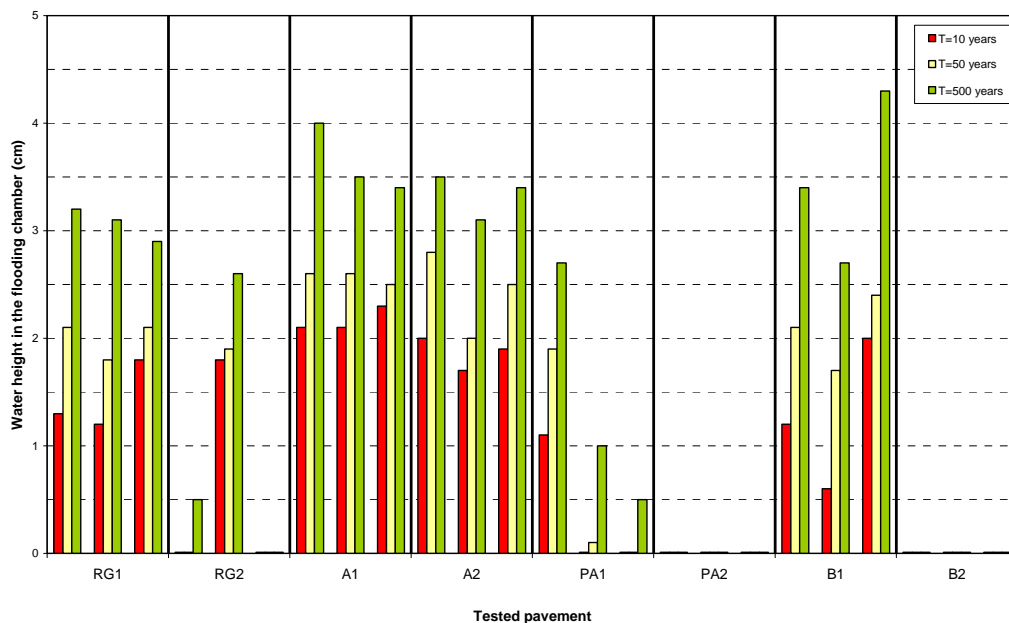


Figure 9. Results with the PCI over the different tested pavements.

4.4 POROUS ASPHALT RESISTANCE TO HYDROCARBONS LEAKAGES

The main conclusions extracted after the simulation of different hydrocarbon leakages with the run-off methodology and the semi-immersion methodology are:

- The proposed methodologies, run-off and semi-immersion, have allowed to characterize the effect of hydrocarbons leakages on porous asphalt, although the run-off test causes slight affections in the pavement resistance, and the semi-immersion test caused bigger affections.
- With the run-off methodology, at the same intermediate level of motor oil spill, the porous asphalt manufactured with BAC binder suffers more disgregation than the one with B 60/70 binder, while with BM-3b modified binder porous asphalt does not suffer any affection.
- The use of the BAC fuel resistant binder is justified in areas where important motor oil leakages are expected with the objective of maintaining the disgregation levels around 25%, according to the run-off methodology and the Cantabrian test of porous asphalt characterization.
- With the semi-immersion methodology, the most affected binder by the action of water is the BAC fuel resistant, with a loss for abrasion of 38.0%, while the less affected was the BM-3b modified binder.
- With the semi-immersion methodology, the gasoil leakage is the most aggressive, followed by motor oil, being gasoline the less aggressive, with the exception of the BM-3b modified bitumen, affected more by gasoline than by motor oil.
- With a fixed dosage of 4.5% of binder, the most appropriate bitumen to manufacture porous asphalt with a high resistance to hydrocarbons spills is the BM-3b modified bitumen, ensuring disgregation below 20% for average levels of hydrocarbon spillages.

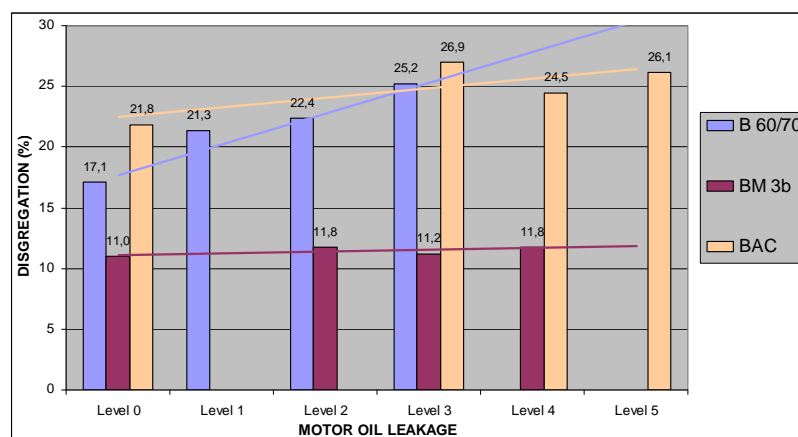


Figure 10. Results obtained with run-off methodology.

4.5 PERMEABLE PAVEMENTS CONSTRUCTION AND FUNCTIONALITY

From the construction and analysis of the functionality of the sections BR, BA, PR and PA (obtained combining concrete blocks with spaces (B) or porous bituminous mixture (P), with granular layers of recycled aggregates (R) or limestone aggregates (A)) by means of measurement of time of reaction and effluent volume answer since a water contribution, the following conclusions have been extracted:

- The design and the construction of experimental areas with permeable pavements should be carried out according to the location, available materials and construction means, carrying out a strict control of quality.
- Immediately after construction, the time of reaction in front of a water contribution depends on the type of aggregates used in the inferior layers and the recycled ones offer a bigger lamination that limestone from quarry.
- Along time, the reaction and answer of the permeable pavement depend on surface type and the porous asphalt offers a better lamination that the concrete blocks.
- The discontinuity of the surface of concrete blocks with slots causes a bigger number of seepage paths that the surface of porous bituminous mixture, which shows a more uniform infiltration capacity.
- In the laboratory, the average of infiltration after 48 hours from the rain simulation is very high due to the open particle size of the aggregates, being of 88.5% for section BR; 87.1% for PR; 89.5% for PA and 89.3% for BA.
- In Gijón, the sections monitored in humid and rainy periods ensured infiltration percentages around 40.0%, while the sections monitored in dry and hot periods registered infiltrations of the order 1.5%, because of the higher absorption of water by the construction materials during these periods.
- Permeable pavements with porous asphalt and granular layers of recycled aggregates are those that offer a bigger lamination of the precipitations with a slow reaction and a leisurely answer.



Figure 11. Experimental car park in Gijón.

5 CONCLUSIONS

5.1 PARTICULAR AND GENERAL CONCLUSIONS

The following particular conclusions give answer to the particular objectives, marked at the beginning of the thesis:

- The state of the art has helped to identify the main problems related to pervious pavements: superficial blockage or clogging and loss of resistance of the porous asphalt because of the action of hydrocarbons spills.
- Based on the previous studies, four types of sections have been selected and designed for their experimental analysis combining surfaces of concrete blocks with spaces or porous asphalt with granular layers of recycled or limestone aggregates.
- The tests carried out with the Fixed Cantabrian Infiltrometer (FCI) in the laboratory help to characterize the clogging resistance of different pervious pavements.
- The tests carried out with the Portable Cantabrian Infiltrometer (PCI) in field help to diagnose the built pervious pavements.
- The tests developed to evaluate the resistance of porous bituminous mixtures to the hydrocarbons leakages allow the selection of the most appropriate bitumen to ensure the correct durability of the surfaces.
- The construction of models with pervious pavements complete sections in the FIDICA Laboratory, in the Campus of Santander and in La Guía car park, in Gijón, have allowed their functional characterization.
- Based on the study of the state of the art and the results of the research carried out, the most appropriate design approaches for permeable pavements have been noticed.

Also, the particular starting hypotheses have been proven and adjusted:

- The main inconvenience of pervious pavements is the clogging of the surface, although the impact is smaller than expected and there are solutions.
- Different types of permeable pavements have different infiltration capacities, however the comparisons are limited.
- Different types of pavements can be diagnosed and compared by means of the measurement of their answer after different contributions of water.
- Significant differences exist among the different types of permeable sections and the materials used for their construction.

The reference project REN2003-05278, "Development of new structures of pavements for the biodegradation of hydrocarbons (FIDICA)", was valued with the qualification of very satisfactory in November of 2007, by the Research General Direction of the Ministry of Education and Science, fulfilling the objectives marked in the same. In the same way, the research projects with the companies Blocks Montserrat and Emilio Bolado have been valued positively by them, giving place to diverse scientific publications and practical applications that validate the results and conclusions presented.

Therefore, this thesis about the "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 Traffics", concludes considering fulfilled its starting general objectives, having studied the permeable constructive technique of the permeable pavements, proposing new sections with recycled aggregates, having analyzed experimentally in laboratory and in field the behaviour of the proposed sections and having picked up the main recommendations for the appropriate design and construction of this type of pavements.

This thesis has proved the functionality and durability of several types of permeable pavements checking their correct application in parkings with light traffic and validating the initial hypothesis of the thesis.

Nevertheless, pervious pavements are sections made up of several layers of construction materials that allow the passage through of water, along time, offering the necessary bearing capacity to resist a light traffic. The use of pervious pavements has a great number of advantages and fundamentally two inconveniences: clogging, that can diminish their functionality along time, and degradation of the construction materials that directly affects their durability. Therefore, pervious pavements as impervious pavements are not the perfect solution. However, through the knowledge of its inconveniences, it has been seen that it is possible to adjust the designs and to take the most appropriate maintenance measures that help to maximize their advantages in each particular case.

5.2 *FUTURE RESEARCH*

The alternatives for future research activities centered in pervious pavements are multiple and varied. Considering the study of the infiltration capacity and clogging prevention, the main future research objectives would be:

- Perfectionate and standardize the clogging resistance test with the Fixed Cantabrian Infiltrometer (FCI), proving new types of pervious pavements

(reinforced grass and porous concrete) and complete permeable sections, trying different combinations of rain intensities and run-off.

- Perfectionate and standardize the diagnosis of pervious pavements with the Portable Cantabrian Infiltrometer (PCI), allowing a quick and simple use of the same one with different simulated rain intensities and durations.
- Simulate different clogging levels in the complete models built in the Laboratory and in the Campus to follow the evolution of the infiltration capacity along time.
- Build new experimental areas correctly sealed to simultaneously monitor several replicas under the same rain events, natural or simulated.
- Develop several systems of cleaning and specific maintenance for each type of permeable pavement that ensure the maximum possible recovery of the lost infiltration capacity because of the natural silt contribution.
- Elaborate theoretical models for the infiltration capacity of a complete structure of pervious pavement for the prediction of the real behaviour of any section facing different contributions of water and silts.

Considering the bearing capacity and the construction materials used in the permeable sections, the main future investigation objectives would be:

- Develop new test methodologies to evaluate the resistance to the tangential efforts of permeable surfaces: porous asphalt, concrete blocks, porous concrete and reinforced grass.
- Develop permeable sections for heavy traffic with continuous porous pavements, reinforced with fibers, or discontinuous permeable pavements, with special systems of load transmission.
- Check the durability of concrete and plastic reinforcements used in the construction of reinforced grass or gravel, analyzing factors like the appearance of tensile strenghts or resistance to ultraviolet radiation.
- Apply the porous concrete in different layers of the permeable section with variations of aditives and dosages to improve the resistances and to avoid possible affections of the salts used in the conservation of roads during winter.
- Develop continuous permeable surfaces with two or three layers with growing permeabilities with depth, using porous bituminous mixture and porous concrete.
- Characterize new granular layers, stabilized or not, that offer permeability, bearing capacity and storage volume for the infiltrated water.
- Develop a catalogue of permeable sections built with different materials adapted to each use and location.
- Elaborate theoretical models of the bearing capacity of a complete permeable structure which allow the prediction of the resistant behaviour.

REFERENCIAS

1. Abbott C.L. & Comino-Mateos (2003). "In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system". *The Journal*. V17 N3, August pp. 187-190.
2. Abbott C.L., Weisgerber A. & Woods Ballard B. (2003). "Observed Hydraulic Benefits of Two UK Permeable Pavement Systems". *Proc. Second National Conference on Urban Drainage*. Coventry University, 23-24 June. ISBN: 1 903818 27 3.
3. Acioli L.A., Agra S.G., Goldenfum J.A. & Silveira A. (2004). "Experimental study of permeable reservoir pavements for surface runoff control at source in a subtropical region" . *NOVATECH'2004, Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, 5 International Conference*; Lyon: Graie; pp 771-778.
4. Acioli L.A., da Silveira A.L.L. & Goldenfum J.A. (2005). "Experimental study of permeable reservoir pavements for surface runoff control at source". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
5. Aguado, A. (1995). "Nuevas tendencias en los hormigones porosos". *VII Jornada del Hormigón del Gremi de Constructors d'Obres de Barcelona i Comarques*.
6. Aguado, A.; Josa, A. & Pindado, M. A. (1997). "Caracterización experimental y numérica de hormigones porosos modificados con polímeros". *Proyecto Brite-Euram BE-3415*. Barcelona: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).
7. Alegre Beneria J. & Xarles Romeu E. (1996). "Hormigón poroso en pavimentos urbanos". *Universitat Politècnica de Catalunya*.
8. Alfakih E., Barraud S., Azzout Y. & Chocat, B. (1995.) "Urban Stormwater: The analysis of failure of the alternative techniques and the management of the quality". *Water Science and Technology*, Vol. 32, No. 1. pp. 33-39
9. Angulo-Jaramillo R., Vandervaere J.P., Roulier S., Thony J.L., Gaudet J.P. & Vauclin M. (2000). "Field Measurement of Soil Surface Hydraulic Properties by Disc and Ring Infiltrimeters. A Review and Recent Developments". *Soil & Tillage Research*. 55 pp 1-29.
10. Aragüés Rioja E., Bambó Naya R. & Lorén Collado A. (2006). "Un parque fluvial para la ciudad". *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, Biodiversidad e Ingeniería*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Zaragoza, 25-27 octubre. ISBN: 84-380-0335-4.
11. Arenas Cabello F.J. (2007). *El impacto ambiental en la edificación. Criterios para una construcción sostenible*. Madrid: Edisofer S.L. Libros jurídicos. ISBN: 978-84-96261-36-5.

12. ASCE (1994). *Design and Construction of Urban Stormwater Management System*. American Society of Civil Engineers (ASCE).
13. ASCE & EPA (2002). *Urban Stormwater BMP Performance Monitoring. A Guidance Manual for Meeting the National Stormwater BMP Database Requirements*. Prepared by GeoSyntec Consultants, Urban Drainage and Flood Control District and Urban Water Resources Research Council (UWRRRC) of ASCE in cooperation with Office of Water (4303T) US Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460, April 2002. EPA-821-B-02-001. 216 p.
14. ASCE & WEF (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*.; Virginia: Water Environment Federation, Alexandria: American Society of Civil Engineers; ASCE *Manuals and Reports of Engineering Practice* No. 77, WEF Manual of Practice FD-20; ISBN: 0-87262-855-8, ISBN: 1-881369-21-8.
15. ASTM D 3385-03 (2003). *Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field using Double-Ring Infiltrometer*. ASTM International. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.08. March 2004. Soil and Rock I.
16. ASTM D 448-03a (2003). *Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction*. ASTM International. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.03. June 2004. Road and paving materials.
17. [Atlantis \(2008\). Atlantis Products.](http://www.atlantiscorp.com.au/product.html) <http://www.atlantiscorp.com.au/product.html> [última fecha de consulta 03/04/2008].
18. [BaseFilt \(2008\). Producto/aplicaciones.](http://www.basefilt.com/indexc.htm) <http://www.basefilt.com/indexc.htm> [última fecha de consulta 03/04/2008].
19. Bayón J.R., Castro D., Moreno-Ventas X., Coupe S.J. & Newman A.P. (2005). "Pervious pavement research in Spain: Hydrocarbon degrading microorganisms". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
20. Bean E.Z., Hunt W.F. & Bidelspach D.A. (2004). "Study on the surface infiltration rate of permeable pavements". *4th IWA World Water Congress 2004*. Marrakech. September 19-24.
21. Bean E.Z., Hunt W.F. & Bidelspach D.A. (2007). "Field survey of permeable pavement surface infiltration rates". *Journal of irrigation and drainage engineering*, Volume 133, Issue 3, pp. 249-255 (May/June).
22. Bendtsen H., Andersen B., Ruth B., Phillips J. & Dunning M. (2005). *Noise-reducing pavements for highways and urban roads - State of the art in Denmark*. Asphalt paving technology: Association of Asphalt Paving Technologists - Proceedings of the Technical Sessions 74, pp 1085-1105.

REFERENCIAS

23. Bhardwaj A. & Singh R. (1992). "Development of a portable rainfall simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies". *Agricultural Water Management*, 22 pp. 235-248.
24. Bond P.C. & Pratt C.J. (1998). "Developments in permeable/porous pavements observations on mineral oil bio-degradation". *Standing Conference on Stormwater Source Control*. Coventry: Coventry University, 8 January.
25. Bond P.C., Newman A.P. & Pratt C.J. (1999). "A review of stormwater quantity and quality performance of permeable pavements in the UK". *Paper presented to the 8th Int. Conf. On Urban Storm Drainage*, Sydney, Australia.
26. Borgwardt S. (2006). "Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 149-160.
27. Brattebo B.O. & Booth D.B. (2003). "Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems". *Water Research* 37. pp. 4369-4376.
28. Bray R.J. (2001). "Environmental monitoring of sustainable drainage at hopwood park motorway service area M42 junction 2". *Proc. First National Conference on Sustainable Drainage*. Coventry. pp. 58-70
29. Brown H.J. (2006). *Pervious Concrete Research Compilation: Past, Present and Future*. RMC Research Foundation. Concrete Industry Management Program. Middle Tennessee State University.
30. Brule B., Le Boulot F. & Simaillaud B. (1993). "Enrobes drainants: Optimisation de la composition des liants et des mastics". *XII Congreso Mundial IRF*. Madrid: Asociación Española de la Carretera. Tomo 3. pp. 259-268 ISBN: 84-88661-06-1
31. Butler D. & Davies J.W. (2000). *Urban Drainage*. London and New York: E & FN Spon; 489 p.
32. Cabrera Cazorla L. & Raso Quintana J. (2006). "Parque urbano de laminación de avenidas de Gavá y Viladecans (Barcelona)". *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, Biodiversidad e Ingeniería*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Zaragoza, 25-27 octubre. ISBN: 84-380-0335-4.
33. Caltrans (2007). *Treatment BMP Technology Report*. California Department of Transportation (Caltrans) Division of Environmental Analysis. Final Report. CTSW-RT-070167.02.02 April.

34. Calzada Pérez M.A. (1984). *Desarrollo y normalización del ensayo de pérdida por desgaste aplicado a la caracterización, dosificación y control de mezclas bituminosas de granulometría abierta*. Tesis doctoral dirigida por Félix Edmundo Pérez Jiménez. Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
35. Campbell N., D'Arcy B., Frost A., Novotny V. & Sansom A. (2004). *Diffuse Pollution*. London: IWA Publishing. ISBN: 1 900222 53 1.
36. Castro D., Bayón J.R., Rodríguez J. & Ballester F. (2005). "Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)". *Interciencia*, May, Vol. 30 No. 5 pp. 255-260.
37. Castro D., Bayón J.R., Rodríguez J. & González-Angullo N. (2006). "Design process of a new concrete block for permeable pavements - Laboratory test studies". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 141-148.
38. CEDEX (2007). *Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano. Manuales y recomendaciones*. R17. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría Técnica Ministerio de Fomento CEDEX: Sección de Edición. ISBN: 978-84-7790-438-0.
39. Chadwick A. & Morfett J. (1993). *Hydraulics in civil and environmental engineering*. London: E & FN Spon, Second Edition. ISBN: 0 419 18160 1.
40. Chaïb J. (2003). *L'hydraulique douce. De nouvelles conceptions face aux inondations et à la pollution*. Connaitre Pour Agir. Agence régionale de l'environnement de Haute-Normandie (AREHN) Avril.
41. CIRIA (2000 a). *Sustainable urban drainage systems, design manual for Scotland and Northern Ireland*; Edición de 2001, London: CIRIA; CIRIA C521; ISBN: 0 86017 521 9.
42. CIRIA (2000 b). *Sustainable urban drainage systems, design manual for England and Wales*; Edición de 2001, London: CIRIA; CIRIA C522, Environment Agency report W230; ISBN: 0 86017 522 7.
43. CIRIA (2001). *Sustainable urban drainage systems, best practice manual for England, Scotland, Wales and Northern Ireland*; Edición de Noviembre 2001, London: CIRIA; CIRIA C523; ISBN: 0 86017 523 5.
44. CIRIA (2008). SUDS. Sustainable Drainage Systems: promoting good practice – a CIRIA initiative. www.ciria.org.uk/suds. [última fecha de consulta 03/04/2008].
45. City of Lincoln, Nebraska & the Lower Platte South Natural Resources District (2006). *Alternative stormwater best management practices. Guidelines*. Public Works and Utilities Department. Watershed Mngement Division. Prepared by Applied Ecological Services, Inc. April.

REFERENCIAS

46. Colandini V., Legret M., Brosseaud Y. & Baladès J.-D. (1995). "Metallic pollution in clogging materials of urban porous pavements". *Water Science and Technology*, Vol. 32, No.1, pp. 47-62.
47. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas y Peritos Agrícolas de Cataluña. (2001). NTJ 14L *Mantenimiento y conservación de los espacios verdes. Mantenimiento de la obra civil: elementos de urbanización*. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Abril.
48. Collins K.A., Hunt W.F. & 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*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 129-139.
49. Colwill D.M. (1997). "Hydraulic conductivity of porous asphalt". *European Conference on Porous Asphalt*. Madrid, 12-14 March pp. 563-583.
50. Corregidor Sanz D. & Fernández Guillén P. (2004). "Energía y Desarrollo Sostenible". *Física y Sociedad. Revista del Colegio Oficial de Físicos*. Nº 15. Noviembre. pp. 16-20.
51. Corun R., Van Rooijen R.C. & de Bondt A.H. (2006). "Performance evaluation of jet fuel resistant polymer-modified asphalt for airport pavements". *ASCE. Airfield and Highway Pavement Specialty Conference*. Atlanta, Georgia, USA. April 30- May 3. ISBN 0784408386.
52. Couchoud Gregori M. (2004). "Detección y medidas de CO2 en la atmósfera. Principales consecuencias". *Física y Sociedad. Revista del Colegio Oficial de Físicos*. Nº 15. Noviembre. pp. 6-11.
53. Coupe S.J., Smith H.G., Newman A.P. & Puehmeier T. (2003). "Biodegradation and microbial diversity within permeable pavements". *European Journal of Protistology* 39: 495-498.
54. Coupe S.J., Newman A.P., Davies J.W. & Robinson K. (2006). "Permeable pavements for water recycling and reuse: initial results and future prospects". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 93-102.
55. Cruz F. & Carswell J. (2003). *Desarrollo y utilización de un ligante resistente a hidrocarburos para aplicaciones asfálticas especiales*. BP Bitumen.
56. Davies J.W., Pratt C.J. & Scott M.A. (2002). "Laboratory study of permeable pavement systems to support hydraulic modelling". *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (9ICUD)* Portland, Oregon, September 8-13 ISBN: 0784406448.
57. De Solminihac H. & Castro J. (2002). "Pavimentos porosos de hormigón: una opción para mitigar los efectos de las aguas lluvias". *Revista BIT*, Junio.

58. "Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo" (1992). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. Río de Janeiro del 3 al 14 de julio de 1992. <http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/spanish/riodeclaration.htm> [última fecha de consulta 03/04/2008].
59. Del Val Melús M.A. (1990). "Perspectivas de futuro de los firmes drenantes". *Seminario sobre Mezclas Bituminosas Drenantes*. España: Asociación Técnica de Carreteras. ISBN: 84-87825-50-8 pp. 57-64.
60. Dierkes C., Lohmann M., Becker M. & Raasch U. (2005). "Pollution retention of different permeable pavements with reservoir structure at high hydraulic loads". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
61. Dierkes C., Kuhlmann L., Kandasmy J. & Angelis G. (2002). "Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements". *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (9ICUD)* Portland, Oregon, September 8-13 ISBN: 0784406448.
62. Dirección General de Carreteras (1990). *Instrucción 5.2-IC Drenaje Superficial*. Madrid: Centro de Publicaciones, Secretaría Técnica, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU). Tecnología Carreteras. Publicación 37. ISBN: 8474336538.
63. Dirección General de Carreteras (1999). *Máximas llluvias diarias en la España Peninsular*. Madrid: Ministerio de Fomento. Centro de publicaciones. ISBN: 84-498-0419-1.
64. Dreiseitl H., Grau D. & Ludwig K.H.C. (2001). *Waterscapes - planing, building and designing with water*. Basel, Berlin, Boston: Birkhäuser. ISBN: 3-7643-6410-6.
65. Dunphy A., Beecham S., Jones C., Collins A., Liebman M., Wells J. & Michael P. (2005). "Confined water sensitive urban design (WSUD) stormwater filtration/infiltration systems for Australian conditions". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
66. Ecocreto (2007). *Garantía de agua para el futuro*. www.ecocreto.com.mx [última fecha de consulta 11/06/2007].
67. Ecovegetal (2007). *Les dalles végétalisées. Constrisons le développement durable*. Folleto y web. <http://www.ecovegetal.fr/> [última fecha de consulta 11/06/2007].
68. EN 12697-40 (2005). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt*. Part 40: In situ drainability. November. European Standard ICS 93.080.20.

REFERENCIAS

69. Environmental Alliance (2001). *Sustainable urban drainage systems: an introduction*; UK: Scottish Environment Agency (SEPA), Environment Agency, Environmental and Heritage Service.
70. EPA (1999a). *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices*. Washington: United States Environmental Protection Agency, Office of Water. August. EPA 921-R-99-012.
71. EPA (1999b). *Storm Water Technology Fact Sheet. Porous Pavement*. Washington: United States Environmental Protection Agency, Office of Water. September. EPA 832-F-99-023.
72. EPA (2000). *Low Impact Development (LID) A Literature Review*. United States Environmental Protection Agency (USEPA) Office of Water. Low-Impact Development Center. October. EPA-841-B-00-005.
73. EPA (2002). *Urban Stormwater BMP Performance Monitoring. A guidance manual for meeting the National Stormwater BMP Database requirements*. GeoSyntec Consultants, Urban Drainage and Flood Control District, Urban Water Resources Research Council (UWRRC) of ASCE and USEPA Office of Water. EPA-821-B-02-001.
74. Euroadoquín (2004). *Manual Técnico para la correcta colocación de los Euroadoquines*. MTCE-04. Madrid: Asociación Española para la Investigación y Desarrollo del Adoquín de Hormigón.
75. Fach S. & Geiger W.F. (2005). "Modelling sorption of 3 heavy metals by porous pavements". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
76. Fach S., Geiger W.F. & Dierkes C. (2002). "Development of an Assessment Procedure for Permeable Pavements". *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (9ICUD)* Portland, Oregon, September 8-13 ISBN: 0784406448.
77. 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.
78. Ferguson B.K. (2006). "Porous pavements: the making of progress in technology and design". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 11-16.
79. Fernández B, Rivera P & Montt JP (2003). "Uso de Pavimentos Permeables". *Revista BIT*. Revista Técnica de Construcción 33: 54-56.
80. Field R., Masters H. & Singer M. (1982). "Status of porous pavement research". *Water Research*, Vol. 16, Issue 6, pp. 849-858.

81. Field R., Struck S.D., Tafuri A.N., Ports M.A., Clar M., Clark S. & Rushton B. (2006a). *BMP Technology in Urban Watersheds. Current and Future Directions*. Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE) ISBN: 0-7844-0872-6.
82. Field R., Tafuri A.N., Muthukrishnan S., Acquisto B.A. & Selvakumar A. (2006b). *The Use of Best Management Practices (BMPs) in Urban Watersheds*. Lancaster, USA: DEStech Publications, Inc. ISBN: 1-932078-46-0.
83. France R.L. (2002). *Handbook of Water Sensitive Planning and Design*. Boca Raton: Lewis Publishers. CRC Press. Integrative Studies in Water Management and Land Development. Editor Robert L. France. ISBN: 1-56670-562-2 Marsalek, J.; Chocat, B. (2002) International Report: Stormwater management; Water Science and Technology, Vol. 46, No 6-7, pp. 1-17.
84. García Gil F.J. (2007). *Prontuario de protección del medio ambiente estatal, autonómico y municipal*. 2ª Edición. Pamplona: DAPP Publicaciones Jurídicas S.L. ISBN: 978-84-96164-50-5.
85. Gerke R.J. (1982). "In Situ Testing of Infiltration of Water through Road Pavements". *11th ARRB Conference Proceedings*. Part 2: Pavements and Structures. 11 pp 178-192.
86. Goacolou H. (1993). "Chaussees-Reservoirs". *XII Congreso Mundial IRF*. Madrid: Asociación Española de la Carretera. Tomo 4. pp. 605-614 ISBN: 84-88661-06-1
87. Gómez M, Sanchez H, Dolz J, López R., Nanía L., Cabrera E., Espert V., García-Serra J., Malgrat P., Puertas J. (2004). *Curso de Hidrología Urbana*. 5ª Edición. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. Enero. 389 p.
88. Gómez Saiz, A. (1997). "Estudio en laboratorio de mezclas drenantes con betunes modificados". *Congreso Europeo de Mezclas Drenantes*. Madrid, 12-14 Marzo pp. 111-117.
89. González Angullo, N. (2005). *Hydraulic Performance of Permeable Pavements*. MSc in European Construction. Project dissertation. Academic Session 2004-2005.
90. González Bolibar, T.R. (1997). "Colmatación y limpieza de mezclas drenantes". *Congreso Europeo de Mezclas Drenantes*. Madrid, 12-14 Marzo pp. 111-117.
91. Gordillo, J. (2001). "Panorámica general de las mezclas bituminosas". *Jornadas sobre caracterización y control de calida de mezclas bituminosas*. 24 de mayo, Sevilla.
92. Grover W.C., Hoiberg A.J. & Haigh T.I. (1972). "Investigation of porous pavements for urban runoff control". *Water Pollution Control Research Series: 11034 DUY*. US Government Printing Office, Washington DC.

REFERENCIAS

93. Hanson-Formpave (2008). *Aquaflow permeable paving*. Hanson - Formpave. http://www.hanson.co.uk/assets/documents/Hanson_Formpave_SUDS_07.pdf [última fecha de consulta 23/02/2008].
94. Hinojosa Cabrera J.A. (2004). "Presentación. El agua y la carretera. Carreteras". *Extraordinario 2004. Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*. ISSN: 0212-6389 pp. 6-13.
95. Hogland W., Niemczynowicz J. & Wahlman T. (1987). "The unit superstructure during the construction period". *Science of the Total Environment*. Vol. 59, pp 411-424.
96. Hollinrake P.G. (1991). "Permeable Pavements". Report SR 264. Hydraulic Research Ltd, Wallingford, Oxfordshire, UK.
97. Hudson N.W. (1997). "Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía". *Boletín de Suelos de la FAO* - 68. M-53 ISBN 92-5-303406-8.
98. IDI (2003). "Technology transfer to Malaysia: Construction of porous pavement". Infrastructure Development Institute - Japan. *Japanese Infrastructure Newsletter*, July, No. 27.
99. INM (2001). *Guía resumida del clima en España 1971-2000*. Plan Estadístico Nacional 2001-2004. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología. Series estadísticas. D25.3. ISBN: 84-8320-179-8.
100. ICPA (1999). "El hormigón poroso. Material innovador para infraestructura vial y urbana". Instituto del Cemento Portland Argentino. *Revista Cemento*, Año 5, Nº 22.
101. Instrucción de Carreteras (2003). ORDEN FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC *Secciones de firme*, de la Instrucción de Carreteras. BOE núm. 297, viernes 12 diciembre. pp. 44274-44292.
102. Jefatura del Estado (2004). REAL DECRETO LEY 2/2004, de 18 de junio, por el que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. BOE núm. 148, sábado 19 de junio. pp. 22453-22457.
103. Jiménez B.R. (1999). "Contaminación por escorrentía urbana". Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; *Colección SEINOR* No. 22. 495 p.
104. Johnston P.M., Bell N.C., Wheater H.S. (1984). "Laboratory Simulation of Urban Runoff Process". *Proceedings of the third International Conference on urban storm drainage*. Goteborg, Swed: Chalmers Univ. 1 pp 233-244.

105. Kellagher R., Woods Ballard B. & Weisgerber A. (2003). "Modelling of Pervious Pavement". *Proc. Second National Conference on Urban Drainage*. Coventry University, 23-24 June. ISBN: 1 903818 27 3.
106. Kluck J., Ganzevles P.P.G., van Wijk M.M. & Beenen A.S. (2005). "IBOS Rengenwater: the Dutch interactive decision support tool for sustainable storm water management". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
107. Knapton J. & Cook I.D. (2006). "Innovative features of Jersey airport's new fire training ground". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 103-118.
108. Kraemer C., Pardillo J.M., Rocci S., Romana M.G., Sánchez Blanco V. & del Val M.A. (2004). *Ingeniería de carreteras*. Volumen II. Madrid: McGraw-Hill. ISBN: 84-481-3998-4.
109. Kuang X., Sansalone J., Teng J., Wang L. & Metcalf J. (2005). "Cementitious porous pavement as a passive unit operation for rainfall-runoff control in the built environment". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
110. Lasa P., Valle Álvarez A. & Castillo López E. (2004). "Nuevos enfoques y soluciones para la gestión sostenible del agua en las infraestructuras urbanas y viales". *II Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente (ICITEMA 2004)*, Santiago de Compostela, 22-24 de noviembre de 2004, V. II: 1037-1049.
111. 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).
112. Legret M., Colandini V. & Le Marc C. (1996). "Effects of a porous pavement with reservoir structure on the quality of runoff water and soil." *Science of the Total Environment* 189/190, pp. 335-340.
113. Lei T., Pan Y., Liu H., Zhan W. & Yuan J. (2006). "A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts". *Journal of Hydrology*. 319 pp. 216-226.
114. Luaces Frades C. & Fernández Aller R. (2006). "Estrategia sectorial de desarrollo sostenible. Oportunidad o amenaza para el sector de los áridos". *I Congreso Nacional de Áridos. Los áridos: un reto para el futuro. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA)*. Zaragoza. 5-7 Octubre. Madrid: Fueyo Editores. ISBN: 84-923128-9-0 pp. 615-620.

REFERENCIAS

115. Manchón L.F., Santamera J.A. & Llorente Sagaseta F. (2000). *Recomendaciones para el proyecto y diseño del viario urbano*. 2ª Edición Revisada. 1ª Reimpresión. Madrid: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones. ISBN: 84-498-0466-3.
116. Marsalek J. & Chocat B. (2002). *International Report: Stormwater management. Water Science and Technology*, Vol No 6 pp 1-17. Environment Canada.
117. Martin C., Ruperd Y., Jaunier M. & Legret M. (2005). "Experience feedback on best management practices for urban stormwater drainage: An assessment of their performance and perception". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
118. Martínez Marín E. (2005). *Hidrología práctica*. Segunda edición. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Servicio de Publicaciones. Colección Escuelas. ISBN: 84-380-0200-5.
119. McBee W.C. & Sullivan T.A. (1977). "Improved Resistance of Surfur-Asphalt Paving Formulations to Attack by Fuels". *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*. Vol. 16, No. 1.
120. McBride C. & Knapton J. (2006). "The design of permeable pavements for retail development in Ireland". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 83-92.
121. McCormack T. (2006). Pavingexpert CD-rom. <http://www.pavingexpert.com/pavindex.htm> [última fecha de consulta 24/06/2006].
122. Membrillo Medrano J. M. (1995). Técnicas especiales de conservación de firmes flexibles. V Jornadas de Conservación de Carreteras. Los contratos de conservación. pp. 279-296.
123. Middlessex University (2003). DayWater Report 5.1. Review K EU RTD 5th Framework Programme. Contract No EVK1-CT-2002-0011. Adaptive Decision Support System (ADSS). for the Integration of Stormwater Source Control into Sustainable Urban Water Management Strategies. 18 August, final version.
124. Mikkelsen P.S., Haeflinger M., Ochs M., Jacobsen P., Tjell J.C. & Boller M. (1997). "Pollution of Soil and Groundwater from Infiltration of highly contaminated stormwater- A case study". *Water Science and Technology*, Vol.36 No.8-9, pp325-330, Elsevier Science Ltd.
125. Ministerio de Medio Ambiente (2007). Programa A.G.U.A. (Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua). <http://www.mma.es/secciones/agua/entrada.htm> [última fecha de consulta 13/08/2007].

126. Ministerio de Fomento (2003). Orden Circular 17/2003. *Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo de obras de carreteras.*
127. MINVU (1996). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos.* Guía de diseño. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Santiago, Chile. 670 p.
128. MOPU (1987). *Mezclas bituminosas porosas*. Secretaria General Técnica, Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. ISBN: 84-7433-491-8, 73 p.
129. Mulder K. (2007). *Desarrollo sostenible para ingenieros.* Barcelona: Ediciones UPC. Título original: Sustainable development for engineers. Traductora: Mariana Donadini. ISBN: 978-84-8301-892-7.
130. Nanía L.S. & Gómez Valentín M. (2004). *Ingeniería hidrológica.* Grupo Editorial Universitario. ISBN: 84-8491-428-3.
131. National SUDS Working Group (2003). *Framework for Sustainable Drainage Systems (SUDS) in England and Wales.* TH-5/03-3k-C-BHEY. 75 p.
132. National SUDS Working Group (2004). *Interim Code of Practice for Sustainable Drainage Systems.* Office of the Deputy Prime Minister.
133. Newman A.P., Coupe S.J. & Robinson K. (2006). "Pollution retention and biodegradation within permeable pavements". *8th International Conference on Concrete Block Paving.* November 6-8. San Francisco, California USA pp. 171-180.
134. Newman A.P., Pratt C.J., Coupe S.J. & Cresswell N. (2002). "Oil bio-degradation in permeable pavements by microbial communities". *Wat. Sci. Tech.*, 45 (7). , 51-56.
135. Newman A.P., Schuttleworth A., Puehmeier T., Wing Ki K. & Pratt C.J. (2003). "Recent Developments in Oil Retaining Porous Pavements". *2nd National Conference on Urban Drainage.* Coventry, UK. June.
136. Niemczynowicz J. (1999). "Urban hydrology and water management – present and future challenges". *Urban Water* No 1. pp 1-14. Elsevier Science Ltd.
137. NLT-167/96 (1996). *Densidad relativa de los áridos en aceite de parafina.* Madrid; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

REFERENCIAS

138. NLT-168/90 (1990). *Densidad y huecos en mezclas bituminosas compactadas*. Madrid; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.
139. 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.
140. NLT-352/00 (2000). *Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste*. Madrid; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.
141. Novotny V. (2007). "Effluent dominated water bodies, their reclamation and reuse to achieve sustainability. Cities of the future: towards integrated sustainable water and landscape management". *Proceedings of an International Workshop held July 12-14, 2006 in Wingspread Conference Center (Racine, WI)*. Edited by: Novotny V. & Brown P.R. IWA Publishing. ISBN: 1843391368 pp. 191-215.
142. Ogden C.B., van Es H.M. & Schindelbeck R.R. (1997). "Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration". *Soil Science Society of America Journal*, 61 pp. 1041-1043.
143. Ogunye F.O. & Boussabaine H. (2002). "Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment". *Construction and Building Materials* 16, 173-180
144. Páez Dueñas A. (2005). "Nuevos betunes anticarburantes". *Jornada Técnica: Panorámica actual de las mezclas bituminosas*. ASEFMA, nuevo enfoque. Madrid, 21 de junio. Comunicación libre.
145. Pagotto C., Legret M. & Le Cloirec P. (1999). "Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement". *Water Research* Vol. 34, No. 18. pp. 4446-4454.
146. Parrilla Alcaide A., Gómez Álvarez M. L. & Juanco García A. (2005). "Normativa sobre el proyecto, construcción y mantenimiento de sistemas de drenaje subterráneo: La Orden Circular 17/2003 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento". *Jornada técnica internacional sobre el agua en explanada y capas de firmes*. Madrid, 27 de octubre.
147. 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". *Meyer/Reichert, editors. Papers of the First International Symposium on Surface Characteristics*, June 8-9, 1988, Pennsylvania. ASTM STP 1031. ISBN: 0-8031-1391-9.

148. Pérez Jiménez F.E., Calzada Pérez M.A. & Gonzalez Bengochea R. (1985). *Mezclas bituminosas porosas: Estudio en laboratorio de sus características permeables y resistencia a la abrasión*. Memoria de la Cátedra de Caminos y Aeropuertos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander para el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU). Dirección General de Carreteras.
149. Pérez Jiménez F.E., Kraemer C. & Lacleta A. (1982). *Mezclas Bituminosas Porosas*. Madrid: MOPU, Dirección General de Carreteras, Servicio de Tecnología.
150. [Permavoid Limited \(2008\). Stormwater management solutions. http://www.permavoid.co.uk/](http://www.permavoid.co.uk/) [última fecha de consulta 03/04/2008].
151. PG-3 (2007). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. Actualizado a 1 de marzo de 2007. 5ª Edición. Ediciones Liteam: Gerardo Bustos Pretel y Enrique Pérez Ibáñez. Colección normativa técnica. ISBN 13: 978-84-95596-88-8.
152. Pindado A.P., Aguado A. & Josa A. (1997). "Fatigue behaviour of polymer-modified porous concretes". *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1077-1083.
153. Pipien G., Tesson M., Bar P., Christory J.P. & Petrongari J.P. (1990). "Chaussées poreuses urbaines". *Revue generale des routes et des aerodromes (RGRA)*. Voirie urbaine. Dossier. No 677 Sept.
154. Pla Sentis I. (1981). "Simuladores de lluvia para el estudio de relaciones suelo-agua bajo agricultura de secano en los trópicos". *Revista de la Facultad de Agronomía*. (Maracay, Venezuela). Volumen XII, No. 1-2. Junio pp 81-93.
155. Poulikakos L.D., Takahashi S. & Partl M.N. (2003). "A comparison of swiss and japanese porous asphalt through various mechanical tests". *Conference paper 3rd Swiss Transport Research Conference (STRC)*, Monte Verità, Ascona. March 19-21.
156. Pratt C.J. (1999a). "Developments in permeable pavements: further observations on mineral oil bio-degradation". *Proceedings Standing Conference on Stormwater Source Control*. Vol. XVII. ISBN 0 905949 80 3.
157. Pratt C.J (1999b). "Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use". *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 5, pp. 145-151.
158. Pratt C.J. (2003). *Application of geosynthetics in sustainable drainage systems*. 1st International Geosynthetics Society, UK Chapter 'Geosynthetics: Protecting the Environment', Loughborough, 17 June.

REFERENCIAS

159. Pratt C.J. (2004). *Sustainable urban drainage. A review of published material on the performance of various SUDS devices prepared for the Environment Agency (UK)*. February.
160. Pratt C.J. & Adams J.R.W. (1981). "Sediment Washoff into Roadside Gullies". *Proceedings of 2nd International Conference on Urban Storm Drainage*, Urbana, Illinois, U.S.A., pp. 174-183.
161. Pratt C.J., Mantle J.D.G. & Schofield P.A. (1989). "Urban stormwater reduction and quality improvement through the use of permeable pavements". *Water Science and Technology*, Vol. 21, Brighton, pp. 769-778.
162. Pratt C.J., Mantle J.D.G. & Schofield P.A. (1995). "UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality". *Water Science and Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 63-69.
163. Pratt C.J., Newman A.P. & Bond P.C. (1999). *Mineral oil bio-degradation within a permeable pavement. Water Science and Technology*, Vol.39 No.2, pp103-109.
164. Pratt C.J., Newman A.P. & Brownstein J.B. (1996). "Bio-remediation processes within a permeable pavement: initial observations". En: *Seventh International Conference on Urban Storm Drainage*, F. Sieker and H. R. Verworn (Eds.), , Hannover, ISBN 3 00 00860 8, pp. 1455-1460.
165. Pratt C.J., Wilson S. & Cooper P. (2002). *Source control using constructed pervious surfaces. Hydraulic, structural and water quality performance issues*. London: CIRIA; CIRIA C582, RP637; 152 p.
166. Preciado Romero J. & Parrilla Juste J. (2006). "Balsas de laminación de avenidas en nuevas actuaciones urbanísticas". *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, Biodiversidad e Ingeniería*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Zaragoza, 25-27 octubre. ISBN: 84-380-0335-4.
167. Puehmeier T., Coupe S.J., Newman A.P., Shuttleworth A. & Pratt C.J. (2004). "Recent developments in oil degrading pervious pavement systems-improving sustainability". *NOVATECH'2004, Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, 5 International Conference*. Lyon: Graie; ISBN: 2-9509337-6-9, págs. 811-818.
168. Quigley M.M., Strecker E.W., Leisenring M., Huber W.C., Heaney J., Weinstein N., Sansalone J. & Bodine D. (2005). "The integrated unit process design approach for source control and best management practice design". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.

169. RAE (2008). Diccionario de la lengua española. Vigésimo segunda edición. Real Academia Española. <http://buscon.rae.es/drae/html/cabecera.htm> [última fecha de consulta 03/04/2008].
170. Raimbault G., Baladés J.D. & Faure-Soulet A. (1985). *Quatre expérimentations françaises de chaussées poreuses*. Bul. Liaison P et Ch. N° 137.
171. Raimbault G., Nissoux J.L. & Barbe B. (1982). *Les chaussées poreuses, une technique nouvelle pour l'assainissement urbain*. Bul. Liaison P et Ch. N° 117. pp. 21-31.
172. Ramier D., Berthier E. & Andrieu H. (2004). "An urban lysimeter to assess runoff losses on asphalt concrete plates". *Physics and Chemistry of the Earth* 29, pp. 839-847.
173. Rankin K. & Ball J.E. (2004). "A review of the performance of permeable pavers". *International Conference on Water Sensitive Urban Design: Cities as Catchments, WSUD2004*, Adelaide, November.
174. Repsol YPF (2007). Betunes especiales. Betún Anticarburo. Folleto y web. http://www.repsolypf.com/es_es/productos_y_servicios/productos/asfaltos/informacion_de_productos/betunes_especiales/betunes_anticarburo/ [última fecha de consulta 03/09/2007].
175. Revilla Cortezón J.A., Liaño Herrera A. & Sáinz Borda J.A. (1982). *Apuntes de hidrología superficial aplicada*. Santander: ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
176. Reyes C., Baraona Pohl E., Pirilla C. (2007). *Arquitectura sostenible*. Valencia: Editorial Pencil S.L. ISBN: 978-84-935145-3-2.
177. Rivard G., Raimbault G., Barraud S., Freni G., Ellis B., Zaizen M., Ashley R., Quigley M. & Strecker E. (2005). "Stormwater source control as a strategy for sustainable development: State of the practice and perceived trends". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
178. Rodríguez Hernández J., Rodríguez Bayón J., Castro Fresno D., Calzada Pérez M.A., Canteras Jordana J.C. & Ballester Muñoz F. (2006). "Construcción de pavimentos permeables para el control en origen de la escorrentía urbana: ejemplo práctico del aparcamiento del Palacio de Deportes de la Guía". *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, Biodiversidad e Ingeniería*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Zaragoza, 25-27 octubre. ISBN: 84-380-0335-4.
179. Rodríguez J., Castro D., Calzada M.A. & Davies J.W. (2005). "Pervious Pavement Research in Spain: Structural and Hydraulic issues". *Proceedings of the 10th International Conference on Urban Drainage (10ICUD)*.

REFERENCIAS

180. Rommel M., Rus M., Argue J., Johnston L. & Pezzaniti D. (2001). "Carpark with 1 to 1 (impervious/permeable) paving: performance of Formpave blocks". *NOVATECH'2001, Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, 4 International Conference; Lyon: Graie, 807-814.
181. Schlüter W. & Jefferies C. (2001). "Monitoring the outflow from a porous car park". *Proc. First National Conference on Sustainable Drainage*. Coventry. pp. 159-169.
182. Schlüter W. & Jefferies C. (2002). "Modelling the outflow from a porous pavement". *Urban Water*. Volume no 4. pp. 245-253.
183. Schlüter W. & Jefferies C. (2005). "The real issues with in-ground SUDS in Scotland". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
184. Scholz M. & Grabowiecki P. (2007). *Review of Permeable Pavement Systems. Building and Environment*. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.016.
185. Schueler T.R. (1987). *Controlling Urban Runoff. A practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Washington Metropolitan Water Resources.
186. Shackel B. (1997). *Water Penetration and Structural Evaluations of Permeable Eco-Paving*. Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Precastig Plant and Technology. 63(3). , pp 110-118. ISSN 0373-4331.
187. Shackel B. (2006). "Design of permeable paving subject to traffic". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 51-60.
188. Siriwardene N.R., Hatt B.E., Deletic A. & Fletcher T.D. (2005). "Laboratory experiments for predicting clogging in stormwater infiltration systems". *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, 2005, Copenhagen, Denmark.
189. Steffen H.S. & Meinheit J. (2006). "Practical experiences and general principles for hydro active traffic areas in Germany". *8th International Conference on Concrete Block Paving*. November 6-8. San Francisco, California USA pp. 17-26.
190. Tan S.A., Fwa T.F. & Guwe V.Y.F. (2000). "Laboratory measurements and analysis of clogging mechanism of porous asphalt mixes". *Journal of Testing and Evaluation*. JTEVA, Vol. 28, No. 3, May, pp. 2007-213.
191. Tan S.A. (2002). *Long-term stability and performance of porous road mixes*. Engineering research. Faculty of Engineering. National University of Singapore. Volume 17. No. 1. http://www.eng.nus.edu.sg/EResnews/0202/rd/rd_2.html [última fecha de consulta 03/04/2008].

192. Temprano González J., Gabriel Cervigni M., Suárez López J. & 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.
193. Tomás Raz R. (1993). "Ligantes resistentes a los carburantes". *XIX Semana de la Carretera. Nuevos materiales para carreteras*. pp. 489-504.
194. Touma J. & Albergel J. (1992). "Determining soil hydrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments: a comparison". *Journal of Hydrology*, 135 pp. 73-86.
195. UNE-EN 12697-40 (2006). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 40: drenabilidad in situ*. Madrid: AENOR. Noviembre. Grupo 13, 17 páginas.
196. UNE-EN 12697-43 (2006). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 43: Resistencia a los combustibles*. Madrid: AENOR. Diciembre. Grupo 12. 16 páginas.
197. UNE-EN 1338 (2004). *Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid: AENOR. Abril. Grupo 40, 70 páginas.
198. UNE-EN 933-2 (1996). *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamicos de ensayo, tamaño nominal de las aberturas*. Madrid: AENOR, Mayo. Grupo 7, 6 páginas.
199. UNE-EN ISO 11058 (1999). *Geotextiles y productos relacionados con geotextiles. Determinación de las características de permeabilidad al agua perpendicularmente al plano sin carga*. Madrid: AENOR. Septiembre. Grupo 16, 23 páginas.
200. Valavala S., Montes F. & Haselbach L.M. (2006). "Area-Rated Rational Coefficients for Portland Cement Pervious Concrete Pavement". *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE. May-June. pp. 257-260.
201. Valle Álvarez A., del Jesus Clemente M., Castro Fresno D. & Ruiz Osés J. (2006). "Avance de las Instrucciones Técnicas sobre Buenas Prácticas Ambientales en Carreteras". *I Congreso de Medio Ambiente en Carreteras*. Santander, 24-28 abril.
202. Washington State Department of Ecology (1997). *Water quality standards for surface waters of the State of Washington*. WAC, Olympia, WA, USA, chapter 173-203A.
203. Wilson S., Bray R. & Cooper P. (2004). *Sustainable drainage systems. Hydraulic, structural and water quality advice*. CIRIA C609 London: CIRIA; ISBN: 0 86017 521 9.

REFERENCIAS

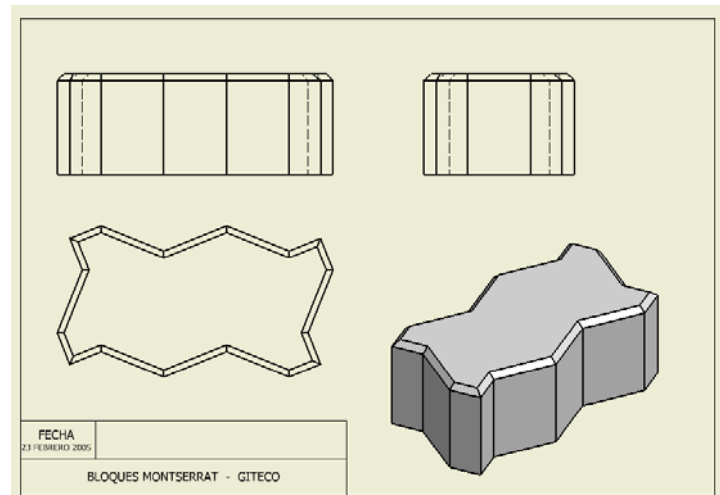
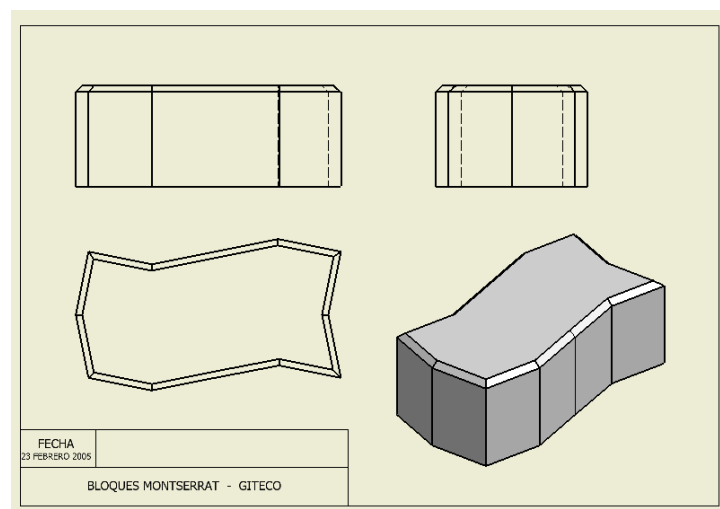
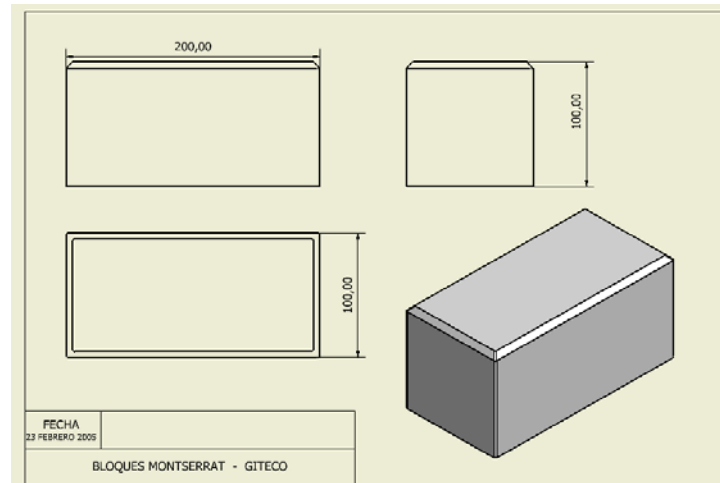
204. Woking Borough Council (2005). *Sustainable Drainage Systems. Climate Neutral Development*. A good practice guide. Endorsed by: South East Climate Change Partnership, UK Climate Impacts.
205. Xu H., Ni F.-J., Chen R.-S. & Liu Q.-Q. (2005). "Durability of porous asphalt mixtures". *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. Volume 5, Issue 2, June, pp. 27-31.
206. Xu H., Ni F.-J., Liu Q.-Q., Shen H. & Chen R.-S. (2004). "Research on hydraulic conductivity of porous asphalt mixture". *China Journal of Highway and Transport*. Vol.17, No. 3. July.
207. Yang J. & Jiang G. (2003). "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials". *Cement and Concrete Research* 33, pp. 381-386.

ANEXOS

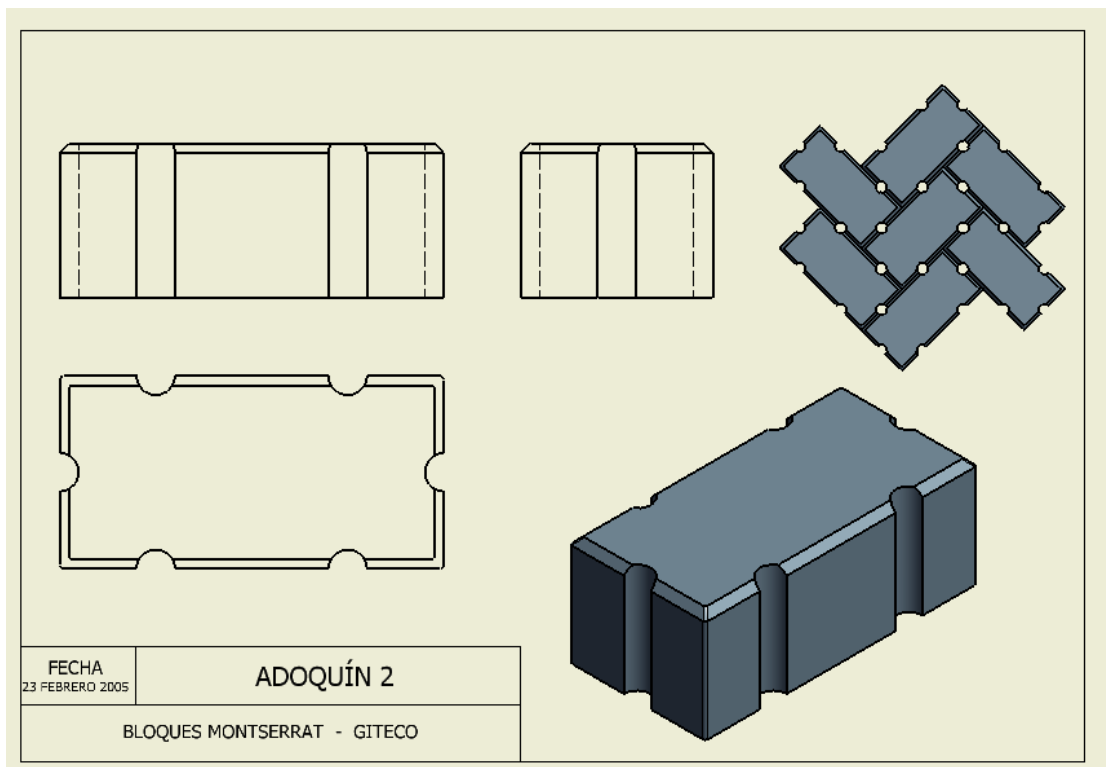
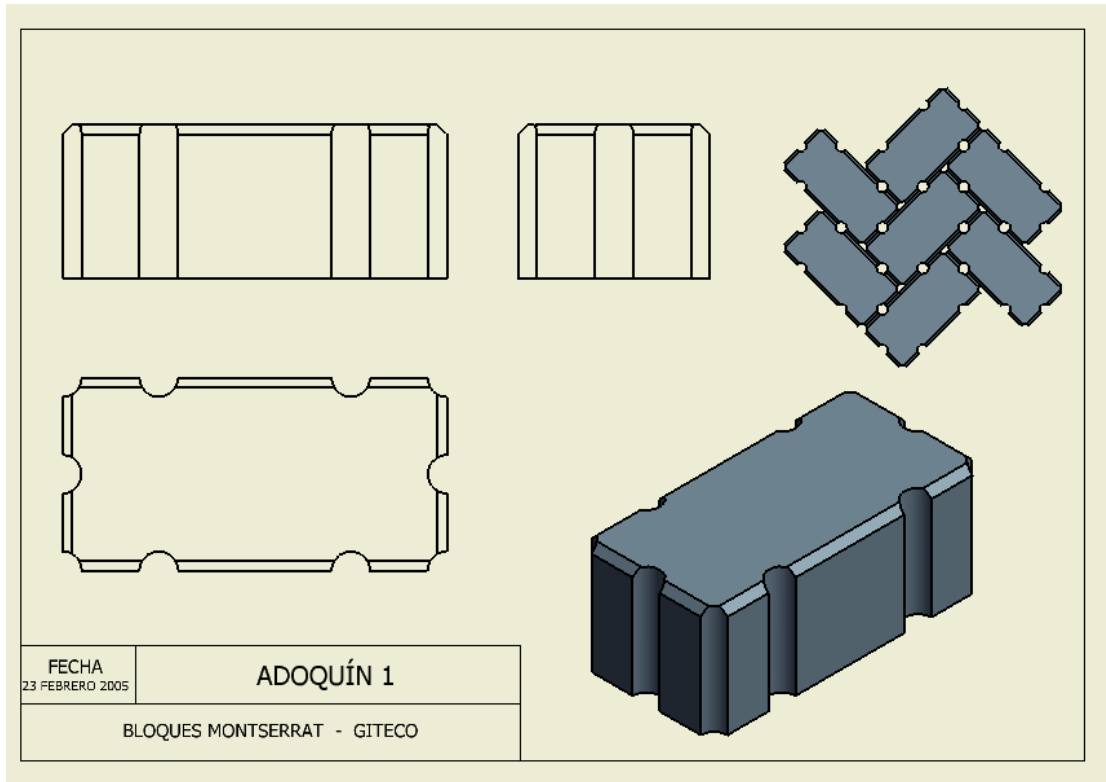
**ANEXO 1: RESISTENCIA A LA COLMATACIÓN DE DISTINTAS
GEOMETRÍAS DE ADOQUINES CON RANURAS**

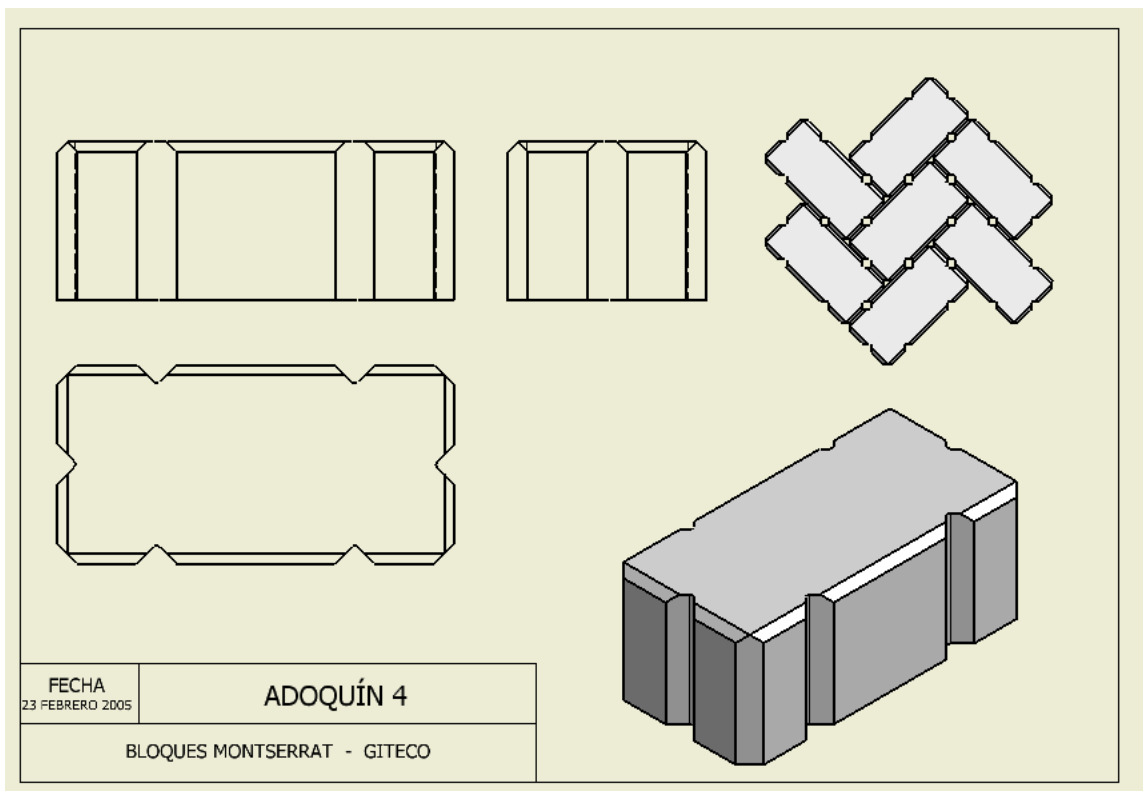
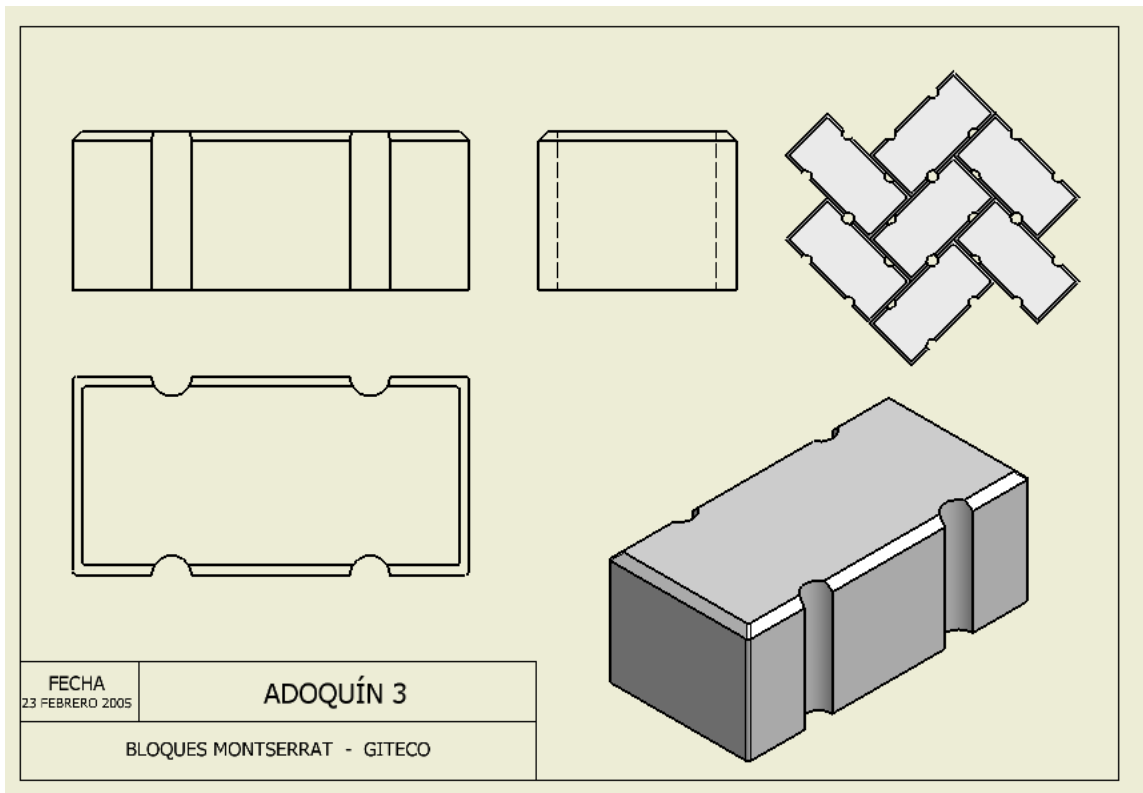
GEOMETRÍAS DE ADOQUINES CON RANURAS

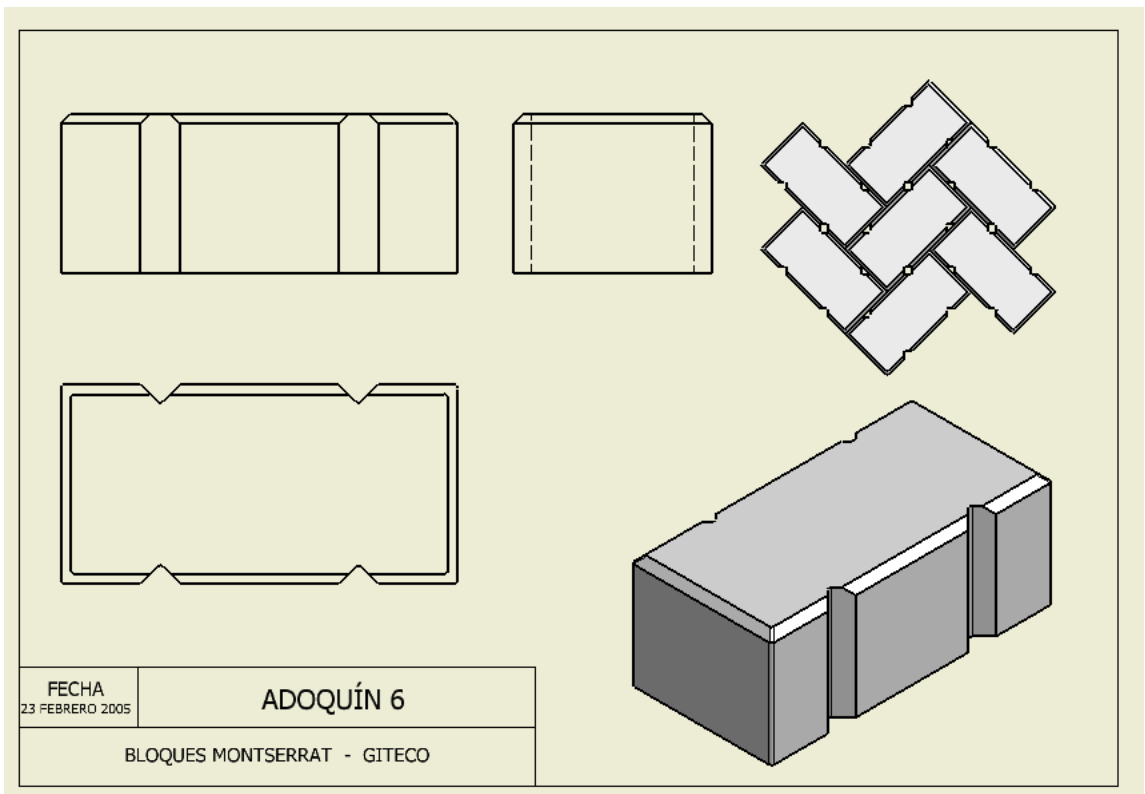
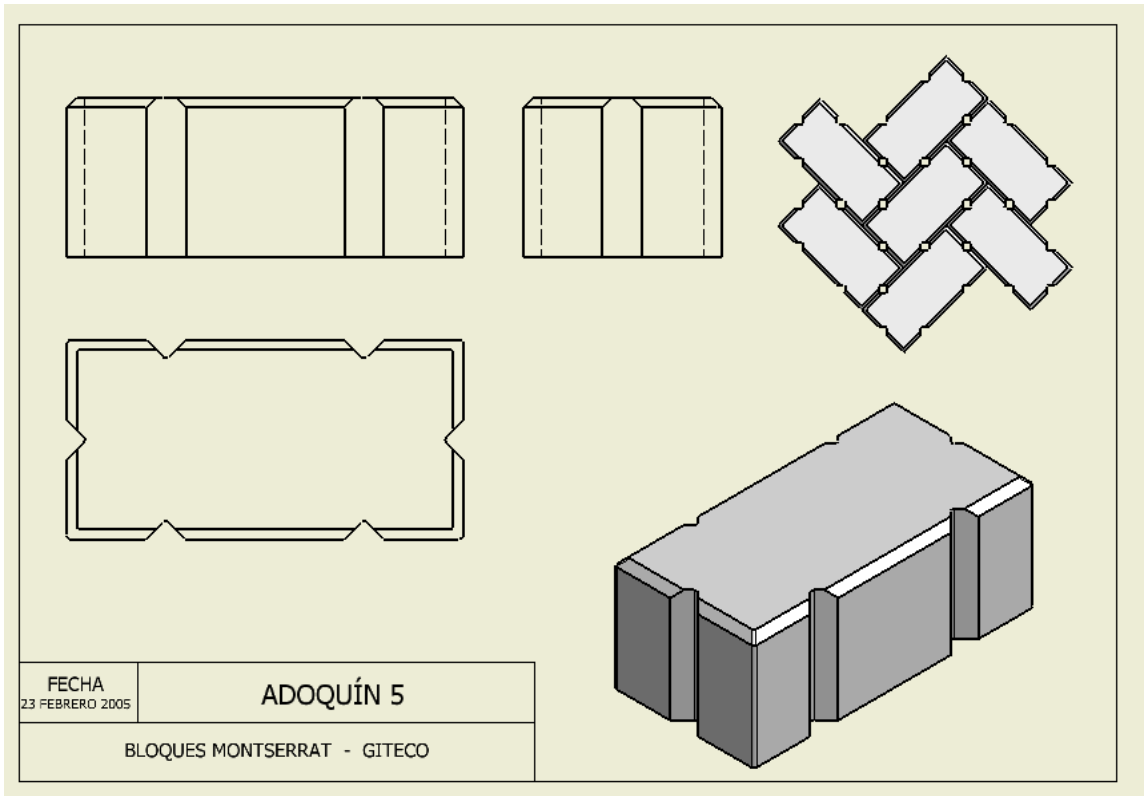
Para el diseño del adoquín para pavimentos permeables de Bloques Montserrat se partió de tres patrones básicos presentados a continuación.

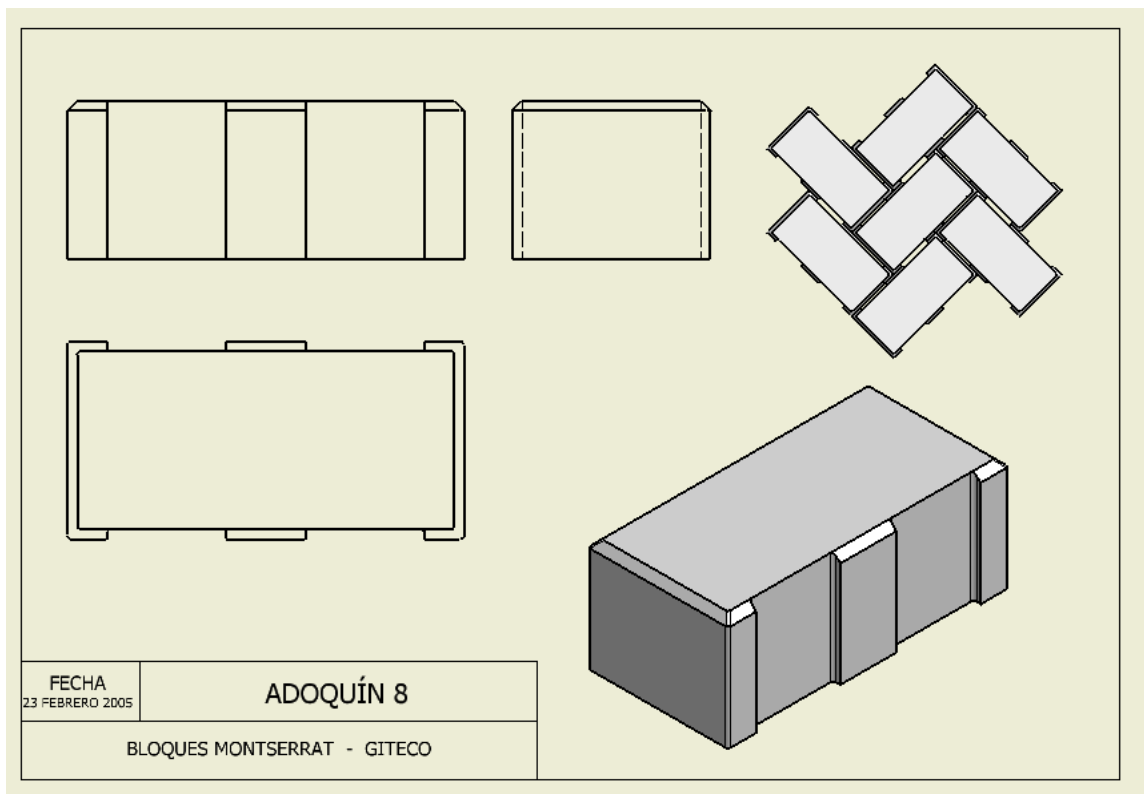
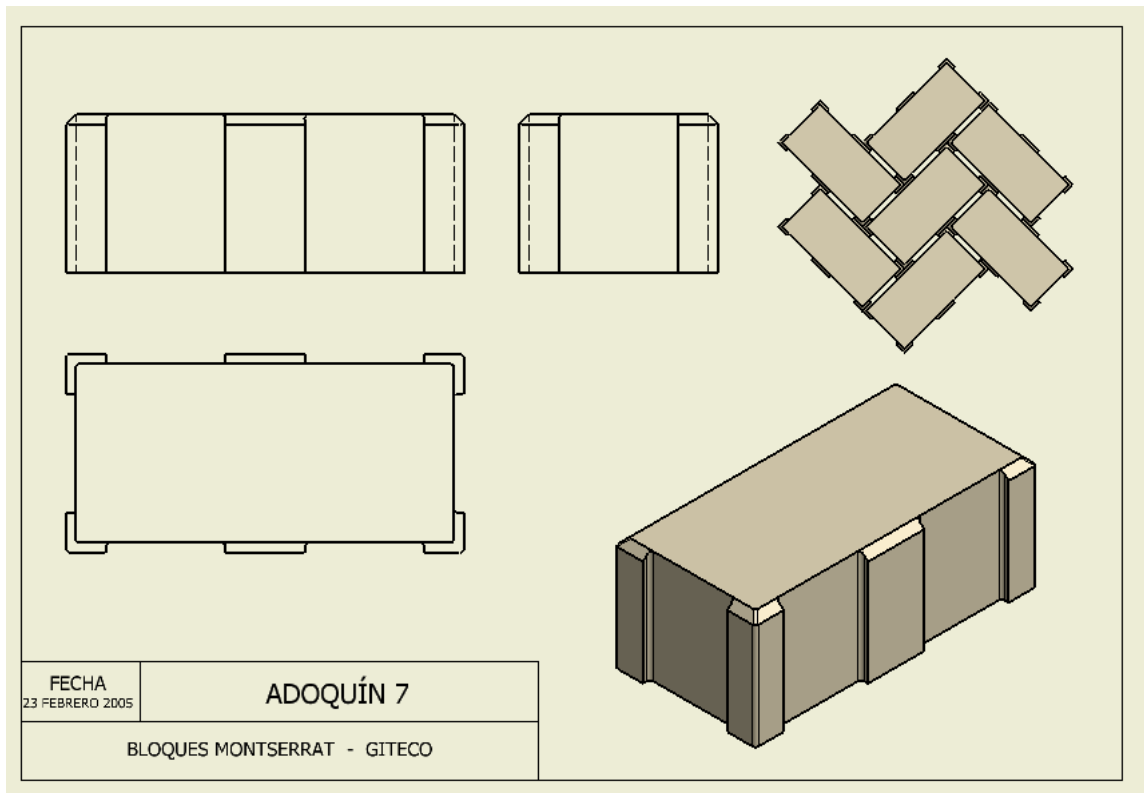


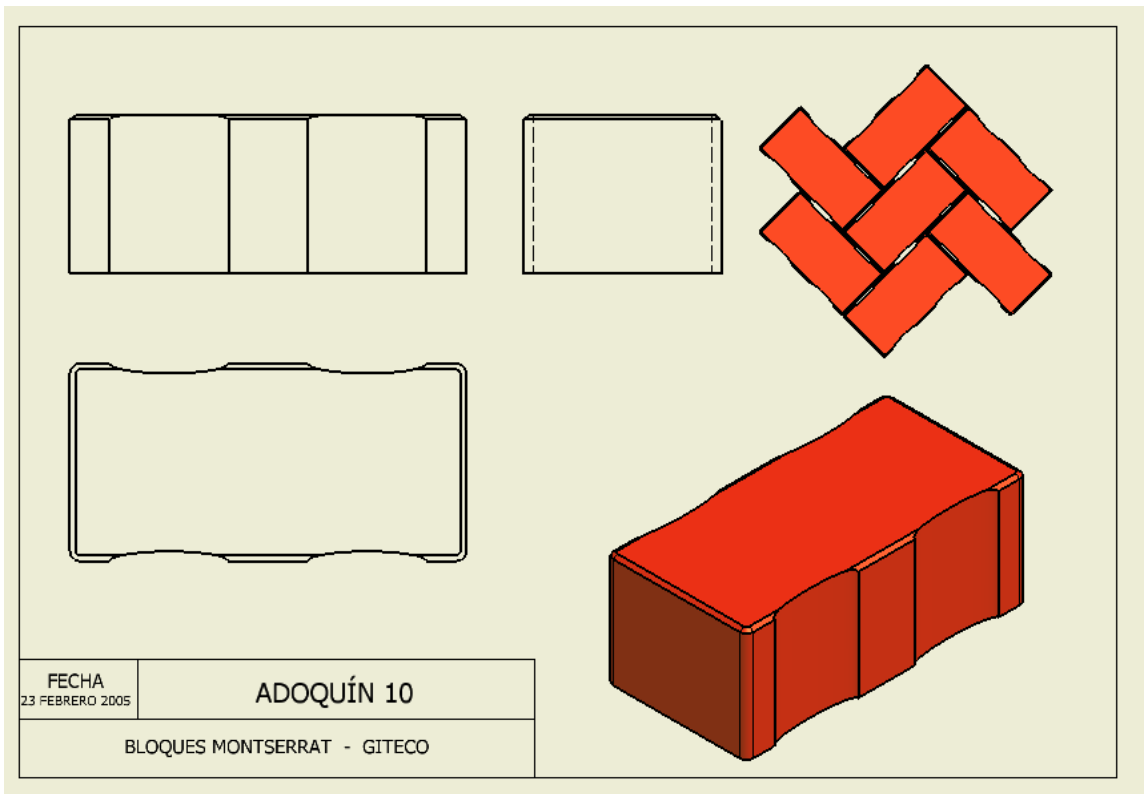
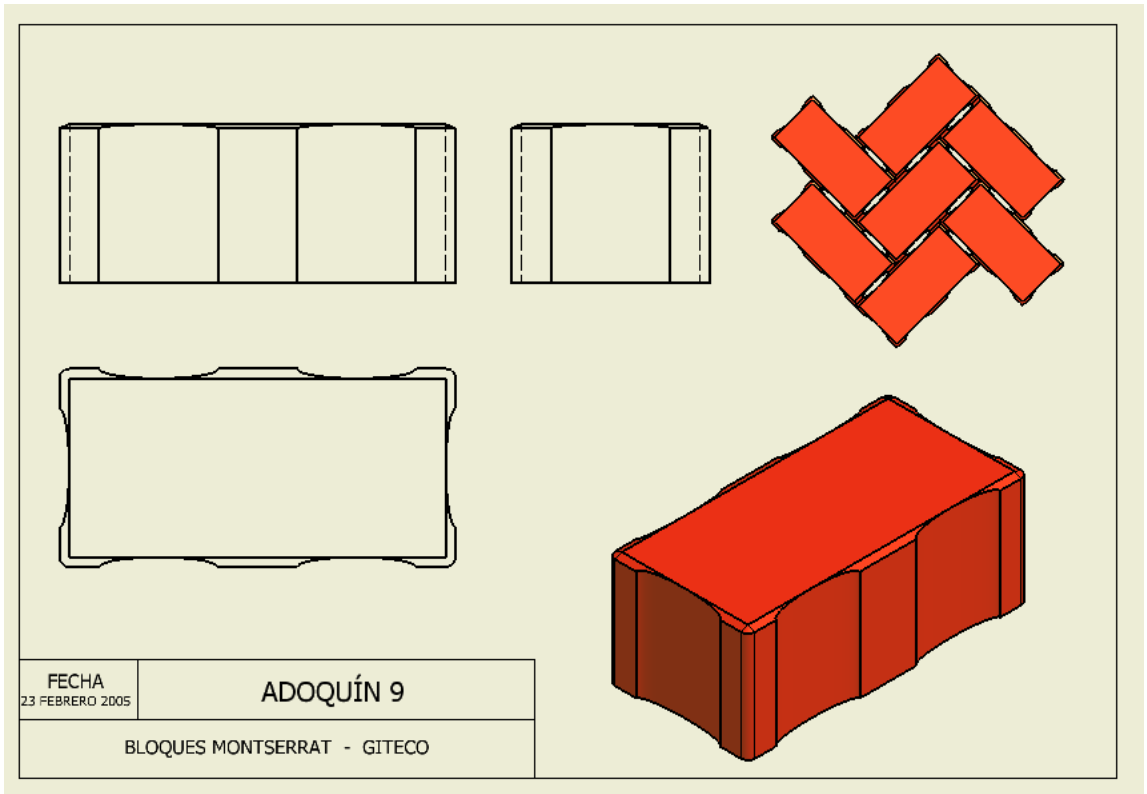
Ajustándose a los tres criterios de evaluación marcados se seleccionó el patrón rectangular y se plantearon doce tipos de adoquines con distintas geometrías y disposiciones de ranuras.

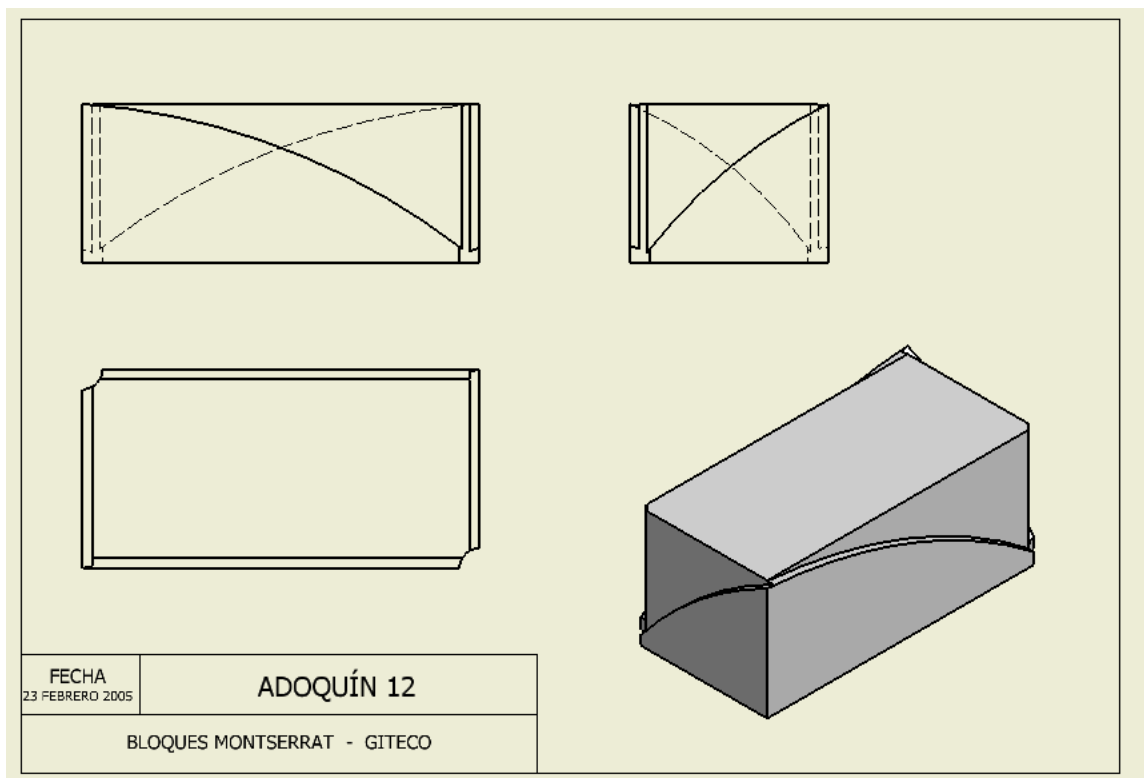
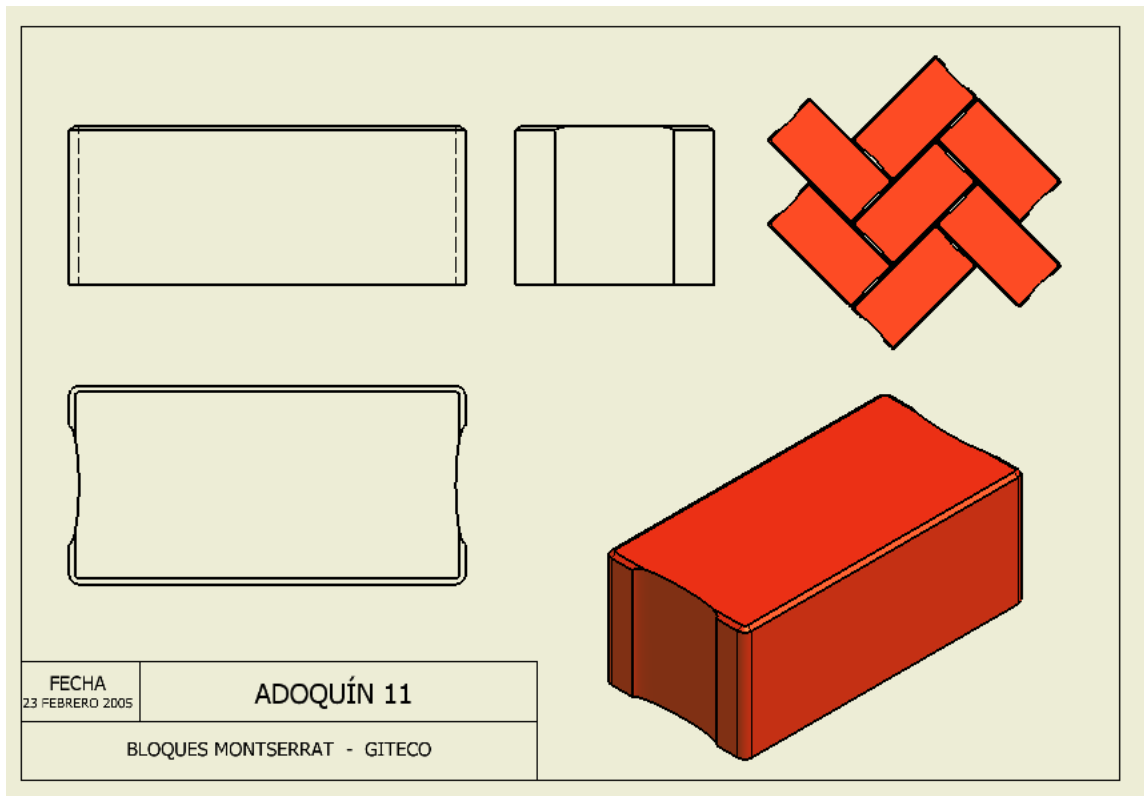




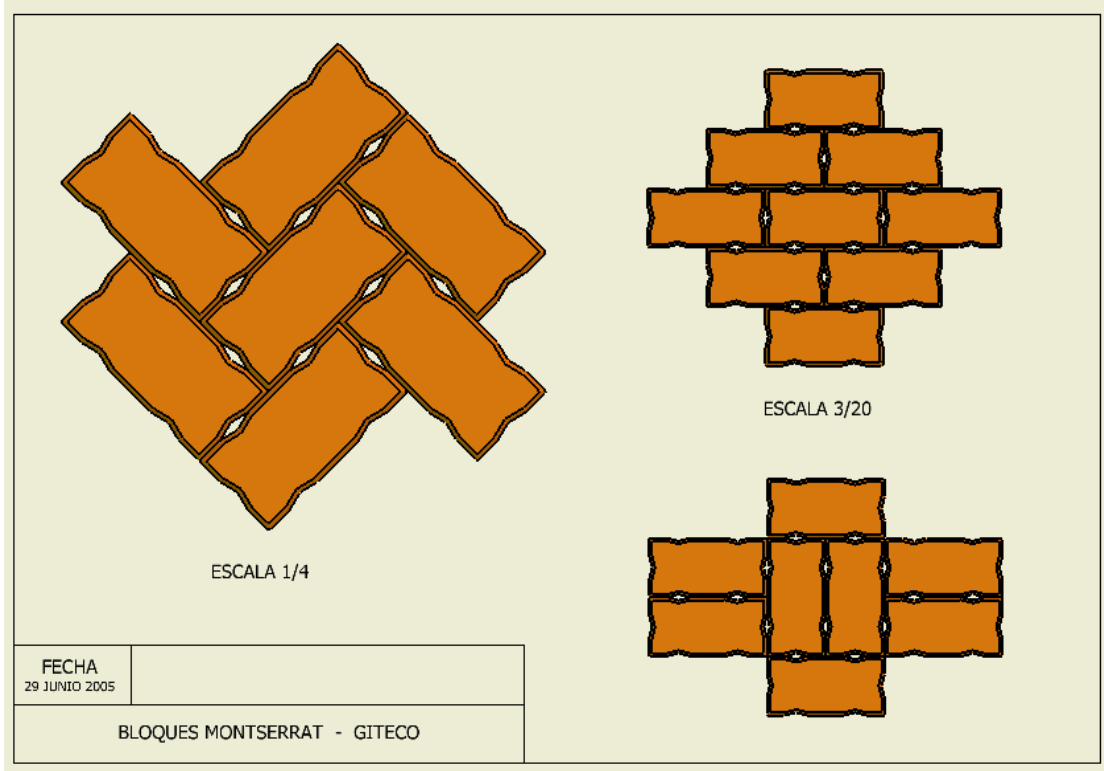
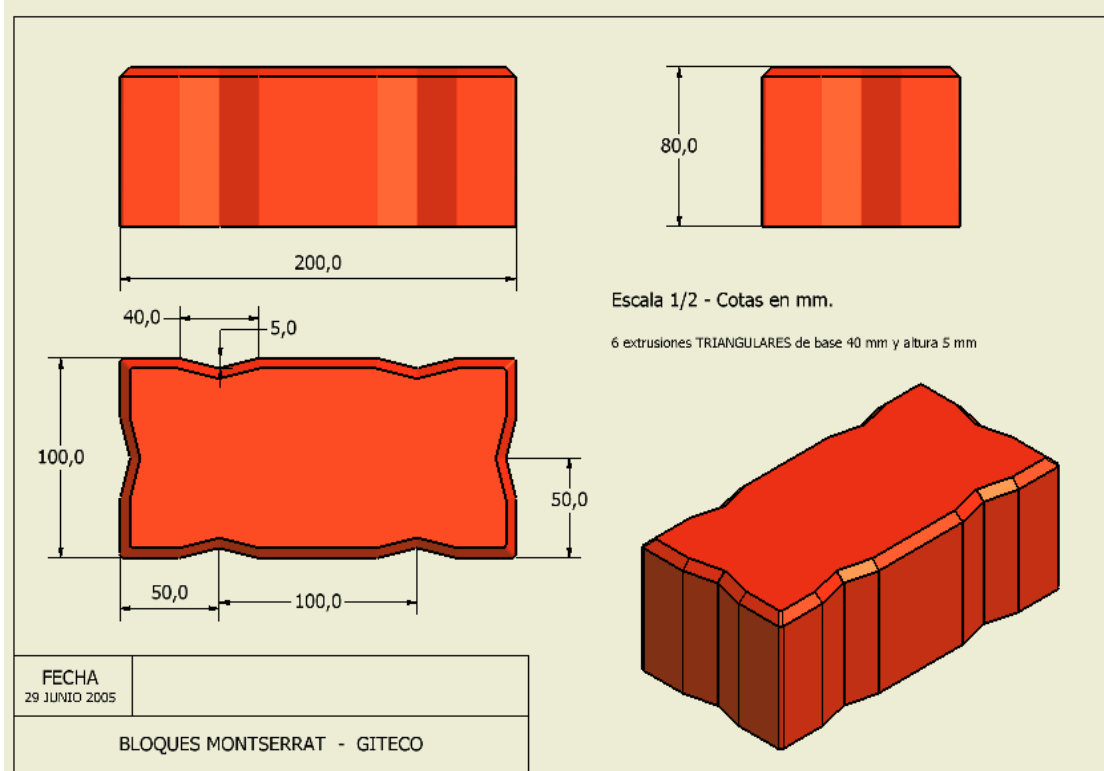


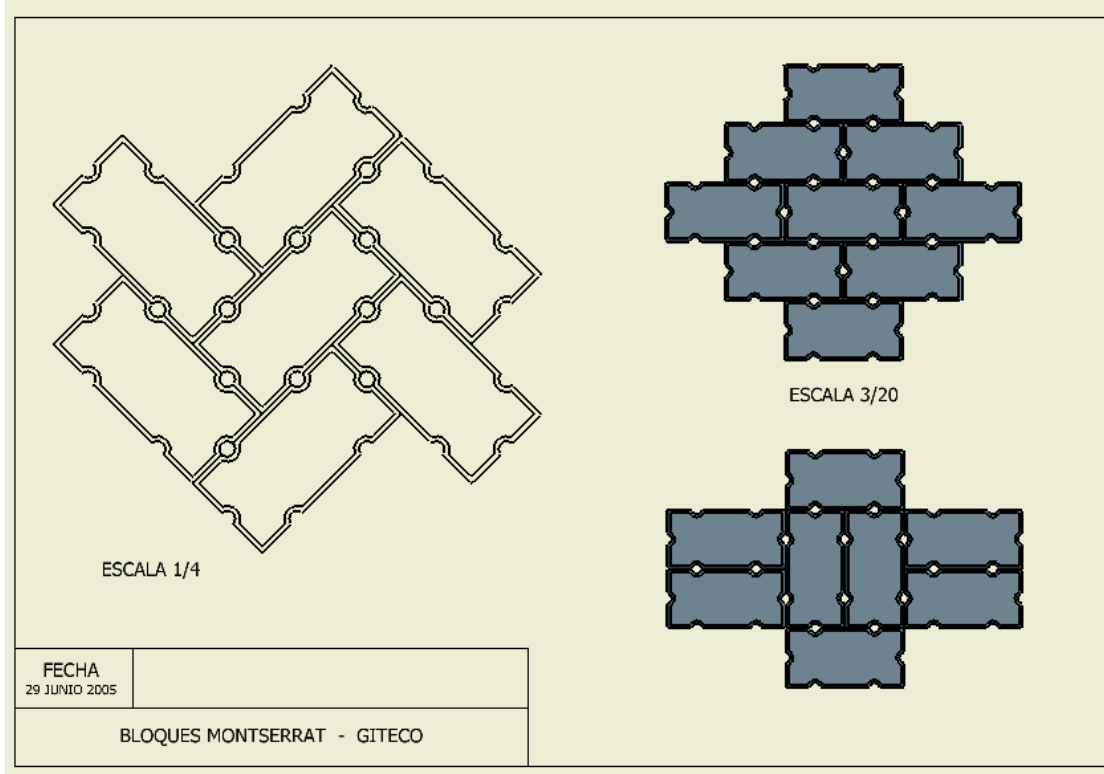
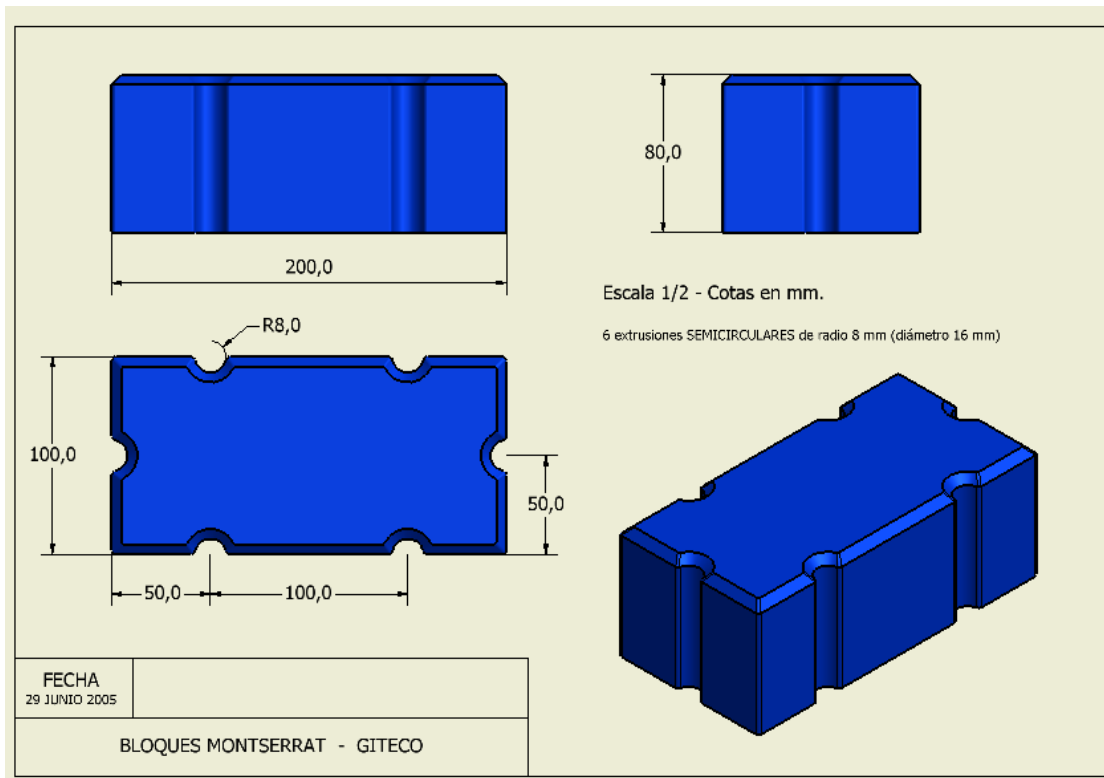


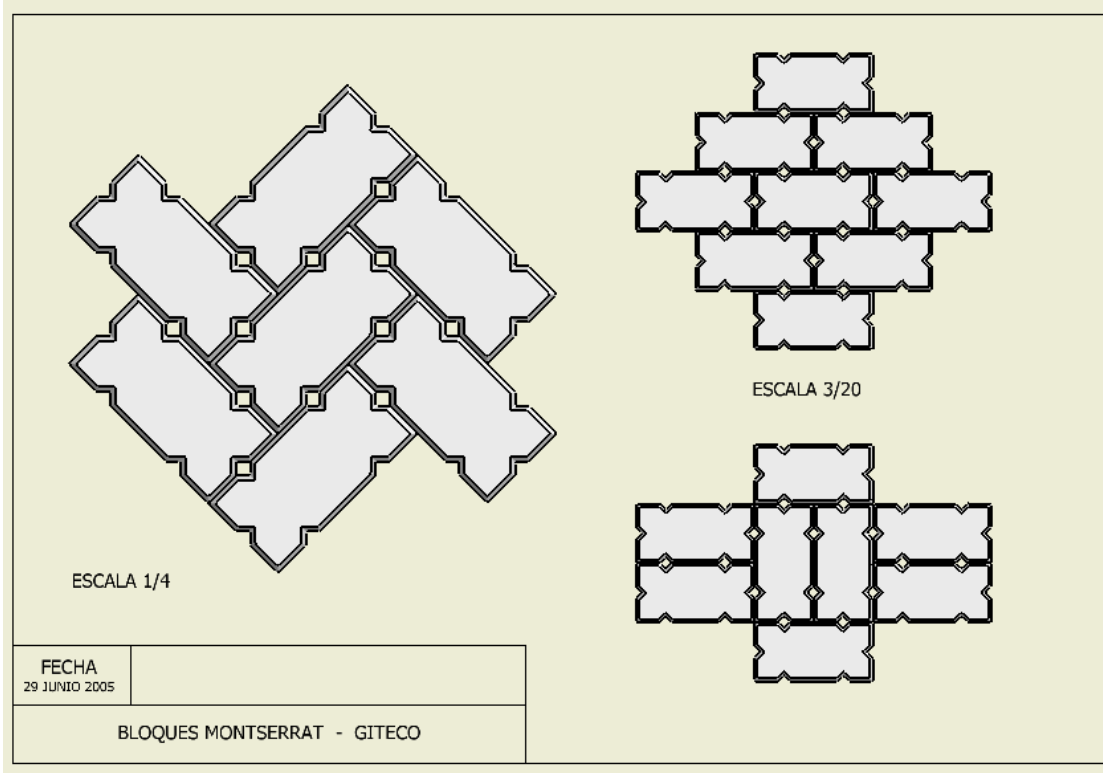
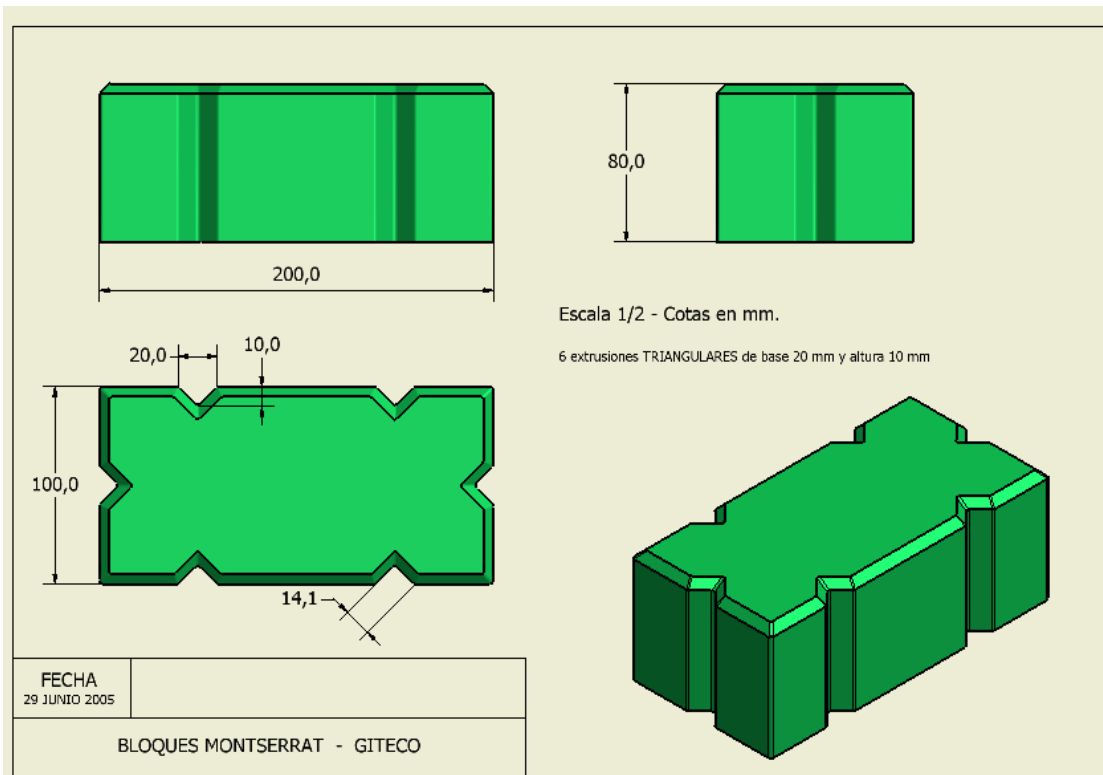


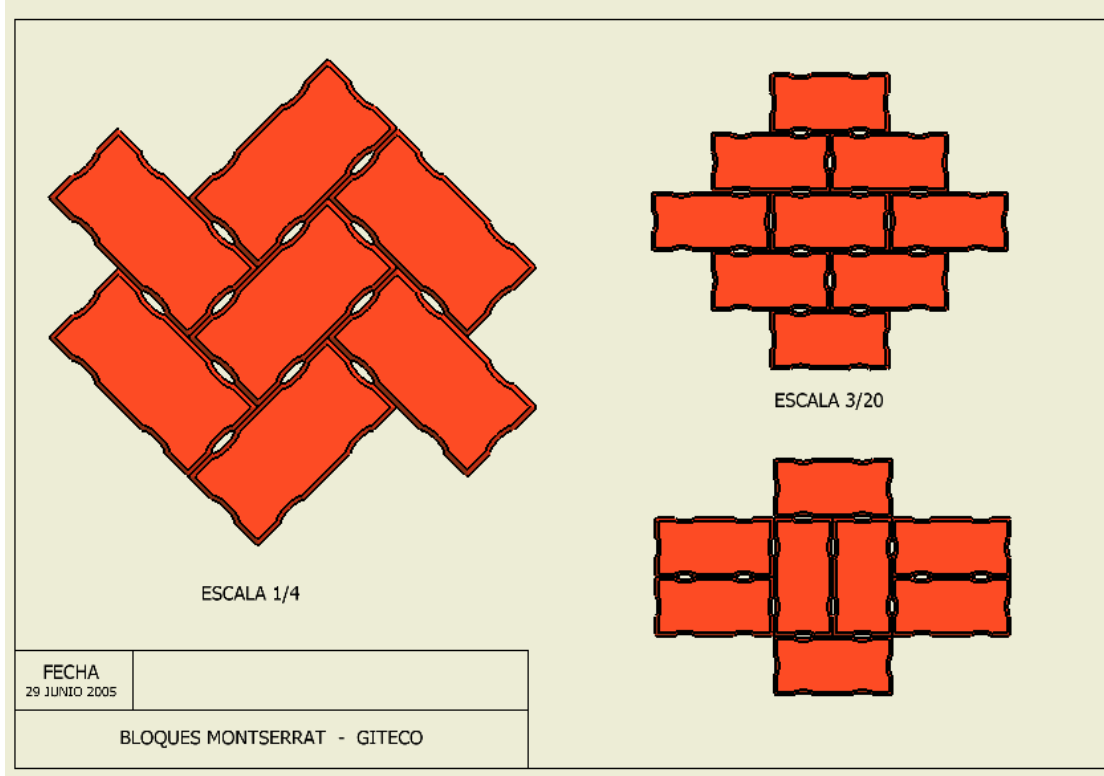
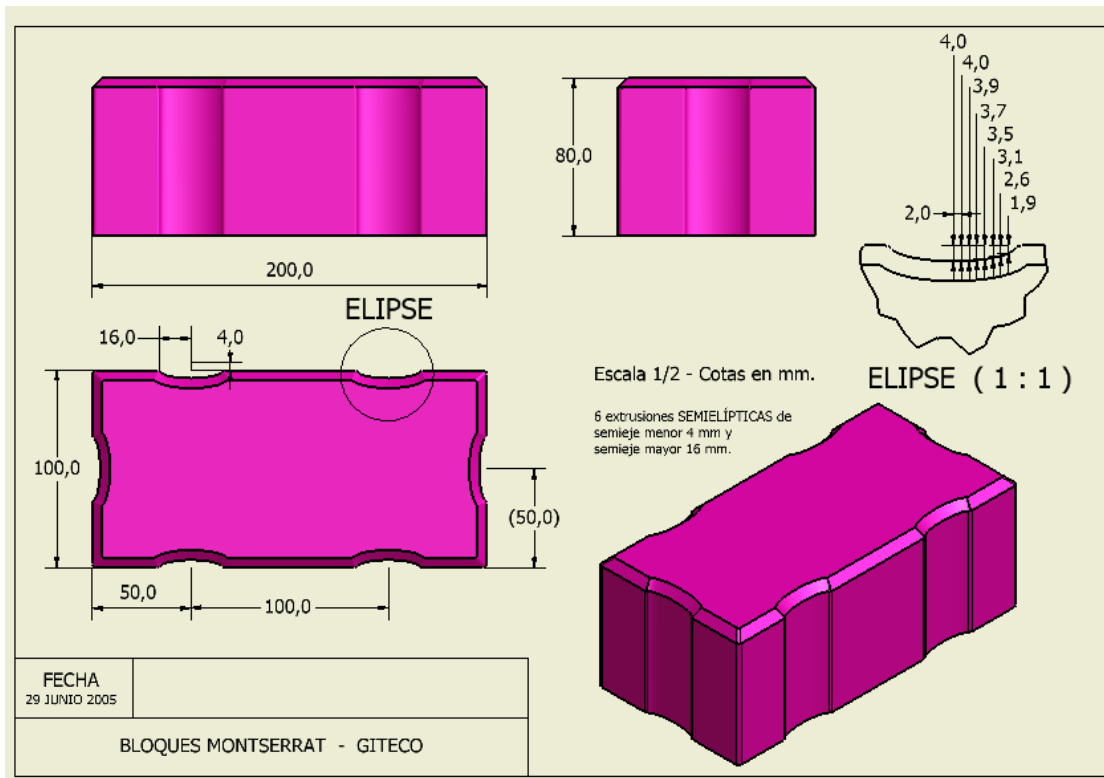


De los doce diseños anteriores se extrajeron las cuatro geometrías más representativas aplicándose a los bloques con seis ranuras para su comparación y ensayo en laboratorio:









RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Porcentajes de distribución del agua recogida – Primera serie (Escenario 1)							
N° de Ensayo	Adoquín	Masa de sedimento (g)	Pendiente	Volumen de agua (ml)	Intensidad simulada (mm/h)	Porcentaje infiltrado	Porcentaje de escorrentía
3	B1	0	0%	7,270	58,2	99,9%	0,1%
3	B1	0	2%	7,665	61,3	99,0%	1,0%
3	B1	0	5%	8,289	66,3	96,9%	3,1%
3	B1	0	10%	8,608	68,9	95,4%	4,6%
6	B2	0	0%	7,714	61,7	99,7%	0,3%
6	B2	0	2%	8,257	66,1	98,6%	1,4%
6	B2	0	5%	8,095	64,8	95,3%	4,7%
6	B2	0	10%	8,284	66,3	92,9%	7,1%
9	B3	0	0%	7,383	59,1	99,7%	0,3%
9	B3	0	2%	10,147	81,2	96,7%	3,3%
9	B3	0	5%	7,655	61,2	94,3%	5,7%
9	B3	0	10%	8,417	67,3	91,4%	8,6%
12	B4	0	0%	7,515	60,1	99,7%	0,3%
12	B4	0	2%	7,604	60,8	99,5%	0,5%
12	B4	0	5%	7,251	58,0	98,8%	1,2%
12	B4	0	10%	8,889	71,1	93,6%	6,4%

Distribución de porcentajes de agua recogida – Primera serie (Escenario 2)							
Nº de Ensayo	Adoquín	Masa de sedimento (g)	Pendiente	Volumen de agua (ml)	Intensidad simulada (mm/h)	Porcentaje infiltrado	Porcentaje de escorrentía
4	B1	500	0%	5,527	44,2	99,9%	0,1%
4	B1	500	2%	7,145	57,2	98,7%	1,3%
4	B1	500	5%	7,017	56,1	97,9%	2,1%
4	B1	500	10%	8,545	68,4	97,0%	3,0%
7	B2	500	0%	8,381	67,0	99,5%	0,5%
7	B2	500	2%	8,343	66,7	97,2%	2,8%
7	B2	500	5%	8,209	65,7	91,4%	8,6%
7	B2	500	10%	7,969	63,8	80,2%	19,8%
10	B3	500	0%	7,480	59,8	99,8%	0,2%
10	B3	500	2%	8,439	67,5	94,2%	5,8%
10	B3	500	5%	8,135	65,1	91,2%	8,8%
10	B3	500	10%	8,524	68,2	78,9%	21,1%
13	B4	500	0%	7,472	59,8	99,9%	0,1%
13	B4	500	2%	8,767	70,1	95,9%	4,1%
13	B4	500	5%	8,367	66,9	94,0%	6,0%
13	B4	500	10%	7,430	59,4	89,3%	10,7%

Distribución de porcentajes de agua recogida – Primera serie (Escenario 3)							
Nº de Ensayo	Adoquín	Masa de sedimento (g)	Pendiente	Volumen de agua (ml)	Intensidad simulada (mm/h)	Porcentaje infiltrado	Porcentaje de escorrentía
5	B1	791	0%	7,548	60,4	100,0%	0,0%
5	B1	791	2%	7,680	61,4	85,5%	14,5%
5	B1	791	5%	7,760	62,1	27,0%	73,0%
5	B1	791	10%	9,156	73,2	16,2%	83,8%
8	B2	665	0%	8,302	66,4	99,1%	0,9%
8	B2	665	2%	7,827	62,6	82,8%	17,2%
8	B2	665	5%	7,913	63,3	61,0%	39,0%
8	B2	665	10%	8,829	70,6	61,5%	38,5%
11	B3	620	0%	8,070	64,6	99,9%	0,1%
11	B3	620	2%	8,895	71,2	56,0%	44,0%
11	B3	620	5%	8,113	64,9	32,4%	67,6%
11	B3	620	10%	7,783	62,3	23,0%	77,0%
14	B4	797	0%	7,112	56,9	98,8%	1,2%
14	B4	797	2%	7,947	63,6	59,6%	40,4%
14	B4	797	5%	8,420	67,4	45,5%	54,5%
14	B4	797	10%	8,356	66,8	32,0%	68,0%

Distribución de porcentajes de agua recogida – Segunda serie (Escenario 1)							
Nº de Ensayo	Adoquín	Masa de sedimento (g)	Pendiente	Volumen de agua (ml)	Intensidad simulada (mm/h)	Porcentaje infiltrado	Porcentaje de escorrentía
15	B1	0	0%	6,727	53,8	100,0%	0,0%
15	B1	0	2%	7,594	60,8	99,3%	0,7%
15	B1	0	5%	8,323	66,6	96,4%	3,6%
15	B1	0	10%	7,609	60,9	94,8%	5,2%
18	B4	0	0%	6,170	49,4	99,6%	0,4%
18	B4	0	2%	6,184	49,5	98,5%	1,5%
18	B4	0	5%	8,012	64,1	95,7%	4,3%
18	B4	0	10%	8,176	65,4	93,8%	6,2%
21	B1	0	0%	8,811	70,5	99,5%	0,5%
21	B1	0	2%	9,603	76,8	99,4%	0,6%
21	B1	0	5%	8,766	70,1	97,3%	2,7%
21	B1	0	10%	9,162	73,3	94,7%	5,3%
24	B4	0	0%	8,516	68,1	99,4%	0,6%
24	B4	0	2%	8,283	66,3	98,3%	1,7%
24	B4	0	5%	8,538	68,3	96,2%	3,8%
24	B4	0	10%	8,526	68,2	93,8%	6,2%

Distribución de porcentajes de agua recogida – Segunda serie (Escenario 2)							
Nº de Ensayo	Adoquín	Masa de sedimento (g)	Pendiente	Volumen de agua (ml)	Intensidad simulada (mm/h)	Porcentaje infiltrado	Porcentaje de escorrentía
16	B1	500	0%	7,502	60,0	99,7%	0,3%
16	B1	500	2%	8,559	68,5	98,2%	1,8%
16	B1	500	5%	8,733	69,9	95,2%	4,8%
16	B1	500	10%	8,157	65,3	92,2%	7,8%
19	B4	500	0%	8,338	66,7	99,6%	0,4%
19	B4	500	2%	7,635	61,1	95,0%	5,0%
19	B4	500	5%	7,289	58,3	92,4%	7,6%
19	B4	500	10%	7,454	59,6	87,5%	12,5%
22	B1	500	0%	7,494	60,0	100,0%	0,0%
22	B1	500	2%	8,473	67,8	97,3%	2,7%
22	B1	500	5%	7,860	62,9	94,8%	5,2%
22	B1	500	10%	7,631	61,0	91,2%	8,8%
25	B4	500	0%	8,528	68,2	99,8%	0,2%
25	B4	500	2%	8,814	70,5	95,5%	4,5%
25	B4	500	5%	8,394	67,2	91,7%	8,3%
25	B4	500	10%	8,137	65,1	86,4%	13,6%

Distribución de porcentajes de agua recogida – Segunda serie (Escenario 3)							
Nº de Ensayo	Adoquín	Masa de sedimento (g)	Pendiente	Volumen de agua (ml)	Intensidad simulada (mm/h)	Porcentaje infiltrado	Porcentaje de escorrentía
17	B1	870	0%	8,061	64,5	99,8%	0,2%
17	B1	870	2%	7,713	61,7	58,7%	41,3%
17	B1	870	5%	8,447	67,6	41,3%	58,7%
17	B1	870	10%	8,089	64,7	22,7%	77,3%
20	B4	821	0%	8,418	67,3	99,3%	0,7%
20	B4	821	2%	7,712	61,7	61,1%	38,9%
20	B4	821	5%	8,274	66,2	36,5%	63,5%
20	B4	821	10%	8,371	67,0	25,6%	74,4%
23	B1	924	0%	9,457	75,7	99,2%	0,8%
23	B1	924	2%	8,782	70,3	74,9%	25,1%
23	B1	924	5%	8,577	68,6	45,4%	54,6%
23	B1	924	10%	9,115	72,9	39,1%	60,9%
26	B4	860	0%	8,976	71,8	99,5%	0,5%
26	B4	860	2%	7,829	62,6	60,9%	39,1%
26	B4	860	5%	8,253	66,0	30,8%	69,2%
26	B4	860	10%	8,306	66,4	25,6%	74,5%

ANEXO 2: RESISTENCIA A LA COLMATACIÓN DE PAVIMENTOS PERMEABLES

*ADOQUINES CON RANURAS**Ajustes del simulador de lluvia y escorrentía*

			Ajuste del simulador de lluvia y escorrentía – ENSAYOS CON ADOQUINES			
Nº de ensayo	Pendiente (%)	Masa de sedimento (g)	Volumen de lluvia simulada (ml/30s)	Intensidad simulada en la lluvia (mm/h)	Volumen de escorrentía simulada (ml/30s)	Intensidad simulada en la escorrentía (mm/h)
1	0	0	109,5	52,6	100,5	48,2
2	2	0	116,5	55,9	93,5	44,9
3	5	0	91,5	43,9	98,5	47,3
4	10	0	108,5	52,1	95,5	45,8
5	8	0	107,5	51,6	92,5	44,4
6	0	500	107,0	51,4	91,5	43,9
7	2,61 (ELIMINADO)	500	102,5	49,2	101,0	48,5
8	2	500	91,0	43,7	91,0	43,7
9	5	500	106,5	51,1	100,5	48,2
10	8	500	93,0	44,6	104,0	49,9
11	10	500	96,5	46,3	100,5	48,2
12	0	1000	92,0	44,2	89,5	43,0
13	2	1000	102,5	49,2	89,5	43,0
14	5	1000	103,5	49,7	94,0	45,1
15	8	1000	104,0	49,9	89,5	43,0
16	10	1000	101,0	48,5	90,0	43,2
17	0	1246,5	101,0	48,5	109,0	52,3
18	2	1246,5	106,0	50,9	105,5	50,6
19	5	1246,5	95,0	45,6	96,0	46,1
20	8	1246,5	102,5	49,2	102,0	49,0
21	10	1246,5	105,5	50,6	104,0	49,9
22	0	1232,5	107,5	51,6	105,0	50,4
23	2	1232,5	94,5	45,4	92,5	44,4
24	5	1232,5	99,5	47,8	101,5	48,7
25	8	1232,5	95,0	45,6	101,0	48,5
26	10	1232,5	103,0	49,4	107,5	51,6

Resultados de los ensayos

A continuación se presentan los pesos de agua recogidos en cada recipiente en cada una de las 3 réplicas de los 26 ensayos realizados. La cámara 6 corresponde a la recogida de la escorrentía residual.

Nº de ensayo	Nº de repetición	Masa de agua recogida (g) – ENSAYOS CON ADOQUINES						
		Infiltrado durante empape	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
1	1	3511,5	2552,5	1814,5	2522,5	1,0	0,5	53,5
1	2	3478,5	2467,0	1822,0	2575,0	0,5	0,0	44,0
1	3	3429,5	2541,0	1875,0	2434,0	0,5	0,0	37,5
2	1	3358,0	1267,5	1114,0	2458,0	1869,5	25,0	739,0
2	2	3352,5	1048,5	1131,5	2510,5	1952,5	3,0	803,5
2	3	3338,0	1048,0	1166,5	2501,5	1879,5	13,0	788,5
3	1	2742,5	551,0	798,5	1977,0	1992,0	506,5	907,5
3	2	2950,0	410,5	948,0	2073,5	1937,0	412,0	746,0
3	3	2894,0	377,5	1035,0	2091,5	1924,0	517,5	715,5
4	1	2982,0	8,0	7,5	1837,5	1602,5	2724,0	1097,0
4	2	3038,0	2,0	88,5	1868,0	1455,5	2740,5	1139,0
4	3	3051,0	0,0	36,5	1865,0	1467,5	2738,5	1196,5
5	1	3057,0	175,0	1295,5	1771,0	1643,5	1550,5	822,0
5	2	3504,0	330,0	1537,0	2328,0	1725,5	1673,0	797,5
5	3	3797,5	395,5	1547,5	2301,5	1689,5	1674,0	841,5
6	1	2754,5	2213,0	1843,5	1686,0	721,0	0,5	17,5
6	2	3266,5	2554,5	1886,0	1547,0	510,5	1,0	14,0
6	3	3401,0	2819,0	1898,5	1568,0	521,0	0,5	16,5
7	1	3301,0	1037,5	1660,5	2295,5	1543,5	375,0	480,0
7	2	3418,0	844,0	1776,5	2287,5	1563,0	332,5	456,0
7	3	3374,5	712,5	1771,5	2320,5	1554,0	390,0	468,5
8	1	2840,0	648,5	1567,5	2331,0	1383,5	26,0	814,5
8	2	2908,0	533,0	1565,5	2239,0	1387,0	35,0	771,5

Masa de agua recogida (g) – ENSAYOS CON ADOQUINES								
Nº de ensayo	Nº de repetición	Infiltrado del empape	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
8	3	2864,0	450,5	1552,5	2241,0	1398,0	34,5	786,0
9	1	3209,0	194,5	1344,0	2744,5	1823,5	872,0	640,0
9	2	3483,0	195,0	1366,0	2791,0	1779,5	869,0	678,0
9	3	3474,0	186,0	1301,0	2710,0	1877,0	845,5	756,5
10	1	3093,0	14,5	651,5	2338,0	1690,5	1553,5	715,5
10	2	3086,0	8,0	481,0	2270,0	1774,5	1612,0	692,0
10	3	3033,5	6,5	333,0	2335,5	1826,0	1682,0	767,0
11	1	2675,0	9,0	535,5	2216,5	1473,5	1833,5	750,5
11	2	2850,5	7,0	339,0	2013,0	1451,0	1819,0	823,0
11	3	2767,5	5,5	253,0	1938,5	1506,0	1892,5	831,0
12	1	1552,0	63,5	1998,5	1927,0	587,5	0,5	1535,0
12	2	2257,0	41,0	1366,5	2356,5	620,0	2,5	1684,5
12	3	2275,5	7,0	1280,5	2494,0	546,0	3,0	1672,5
13	1	2178,0	6,5	96,0	3049,0	1533,0	343,5	1618,0
13	2	2541,5	2,5	51,0	2965,0	1685,5	484,5	1334,5
13	3	2525,5	2,0	61,0	2833,0	1642,5	548,5	1341,0
14	1	2689,5	23,5	53,0	1832,0	1960,0	1894,5	966,5
14	2	2916,5	3,5	45,5	1732,5	1992,5	2230,5	615,5
14	3	2994,0	1,0	50,0	1554,0	1902,0	2454,5	571,0
15	1	2743,0	6,0	2,5	622,0	1180,5	3735,0	1157,5
15	2	2807,5	4,0	0,5	750,0	1173,0	3653,5	1081,5
15	3	2720,0	3,0	0,0	589,5	1202,0	3586,5	1204,0
16	1	2075,5	6,0	12,5	95,5	198,0	4052,0	2348,5
16	2	2149,0	2,5	0,0	53,5	143,0	3862,5	2639,0
16	3	1974,0	1,0	0,0	37,5	120,5	3846,0	2631,0
17	1	1240,5	1268,5	676,0	1501,0	314,0	4,0	3253,5
17	2	2000,0	1753,5	476,5	1702,5	304,0	2,5	2856,0
17	3	2194,0	2129,5	410,0	1577,0	280,5	2,5	2675,5
18	1	822,5	381,0	146,0	935,5	526,5	89,5	5290,5
18	2	948,5	237,0	158,5	940,5	500,5	7,0	5457,5
18	3	834,5	194,5	155,5	860,5	410,5	5,5	5590,0

		Masa de agua recogida (g) – ENSAYOS CON ADOQUINES						
Nº de ensayo	Nº de repetición	Infiltrado del empape	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
19	1	240,5	6,5	5,0	233,0	482,5	160,5	5839,5
19	2	466,5	2,0	1,5	325,0	524,0	220,0	5518,5
19	3	593,3	0,5	0,5	361,5	549,0	249,5	5370,5
20	1	245,5	6,0	4,0	115,5	145,5	1001,5	6530,0
20	2	622,5	3,0	0,0	109,0	155,0	999,5	6445,5
20	3	621,5	1,5	0,0	102,0	148,5	969,5	6440,5
21	1	226,5	6,0	8,5	3,0	2,0	616,0	6953,5
21	2	306,5	2,0	0,5	0,0	2,0	656,0	6815,5
21	3	321,5	0,5	0,0	0,0	2,0	687,5	6734,5
22	1	1673,5	2921,0	205,5	686,5	278,0	2,0	3589,5
22	2	1995,0	2689,5	227,0	783,0	309,5	2,0	3507,0
22	3	2028,0	2685,5	205,5	929,0	279,0	2,0	3460,5
23	1	306,0	202,0	152,5	687,5	372,6	3,0	5474,5
23	2	703,5	148,0	173,0	702,5	376,5	3,0	5495,0
23	3	698,5	92,5	174,5	696,0	372,0	3,0	5540,5
24	1	224,5	5,5	6,5	290,5	364,5	205,5	6589,5
24	2	470,5	1,5	0,5	400,5	411,5	276,0	6411,5
24	3	543,0	0,5	0,0	348,5	524,5	216,5	6304,5
25	1	278,0	8,0	1,0	26,0	71,0	715,5	6387,5
25	2	404,0	4,0	0,0	17,0	92,5	703,5	6360,0
25	3	389,5	3,0	0,0	16,5	93,0	705,0	6330,5
26	1	225,0	5,5	1,5	0,0	2,0	673,5	7439,5
26	2	343,0	2,0	0,5	0,0	2,0	716,5	7249,0
26	3	347,5	1,5	0,0	0,0	2,0	722,0	7282,5

Análisis de regresión

El número de valores disponibles en el caso del ensayo de resistencia a la colmatación de pavimentos permeables de adoquines con ranuras es de 375. Estos valores han sido obtenidos de la medición del valor de infiltración en 5 distancias, con 5 cargas de sedimento y 5 inclinaciones, repitiendo 3 veces cada medida ($5 \times 5 \times 5 \times 3 = 375$).

El objetivo de este análisis es expresar los resultados del agua infiltrada, en %, en función de las siguientes variables deterministas (cuya distribución no es normal):

- Distancia respecto a la línea de aportación de escorrentía superficial en cm.
- Carga de sedimento que soporta la superficie en kg/m^2 .
- Inclinación de la superficie en %.

El programa empleado para el estudio estadístico ha sido el SPSS-15. Y se fija desde un inicio que la regresión planteada debe cumplir las siguientes hipótesis:

- Independencia o no multicolinealidad de las variables explicativas.
- No autocorrelación o covarianza nula de los residuos del modelo.
- Homoscedasticidad o varianza constante de los residuos del modelo.
- Normalidad de los residuos del modelo.

Primer modelo:

Como primer paso se plantea la regresión lineal obteniendo el siguiente modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = 36,009 + 1,403 \cdot \text{Distancia (cm)} - 8,352 \cdot \text{Sedimento (kg/m}^2) - 3,661 \cdot \text{Inclinación (\%)}$$

Correlaciones

		Infiltración	Distancia cm	Sedimento	Inclinación
Correlación de Pearson	Infiltración	1,000	,593	-,480	-,403
	Distancia cm	,593	1,000	,000	,000
	Sedimento	-,480	,000	1,000	,000
	Inclinación	-,403	,000	,000	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración	.	,000	,000	,000
	Distancia cm	,000	.	,500	,500
	Sedimento	,000	,500	.	,500
	Inclinación	,000	,500	,500	.
N	Infiltración	375	375	375	375
	Distancia cm	375	375	375	375
	Sedimento	375	375	375	375
	Inclinación	375	375	375	375

Diagnósticos de colinealidad^a

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de la varianza			
				(Constante)	Distancia cm	Sedimento	Inclinación
1	1	3,383	1,000	,01	,01	,02	,02
	2	,322	3,241	,00	,02	,20	,77
	3	,225	3,877	,01	,39	,54	,07
	4	,070	6,958	,98	,57	,24	,14

a. Variable dependiente: Infiltración

No se detectan problemas de colinealidad dado que las variables explicativas no están correlacionadas entre sí y los índices de condición del diagnóstico de colinealidad son menores de 30.

Resumen del modelo^b

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. del cambio en F	
1	,863 ^a	,745	,743	16,99022	,745	361,292	3	371	,000	1,242

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación, Sedimento, Distancia cm

b. Variable dependiente: Infiltración

El modelo planteado tiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,745$ (el modelo explica un 74,5% de la variabilidad de los resultados) y el estadístico de Durbin Watson tiene un valor más próximo a 2 que a 0 ó a 4, lo que indica que no hay problemas de autocorrelación de los residuos.

Gráfico de dispersión

Variable dependiente: Infiltración

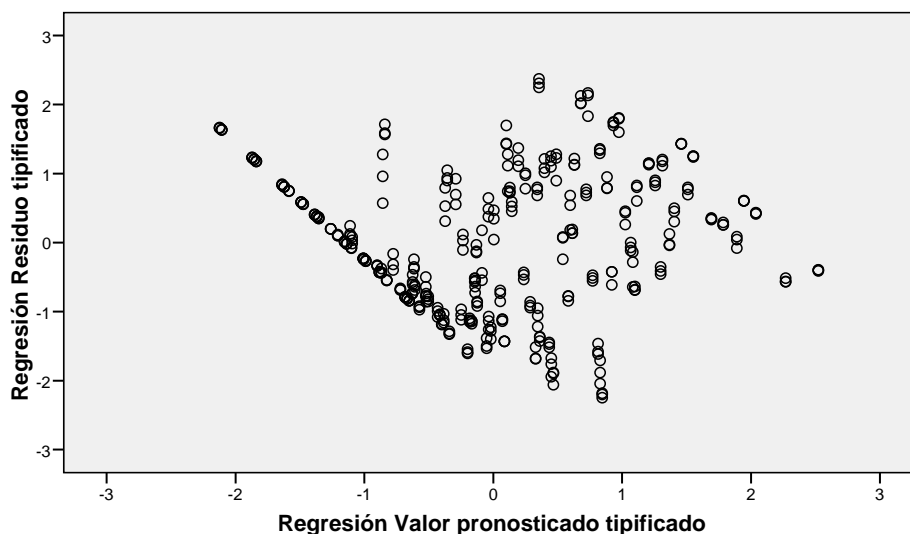
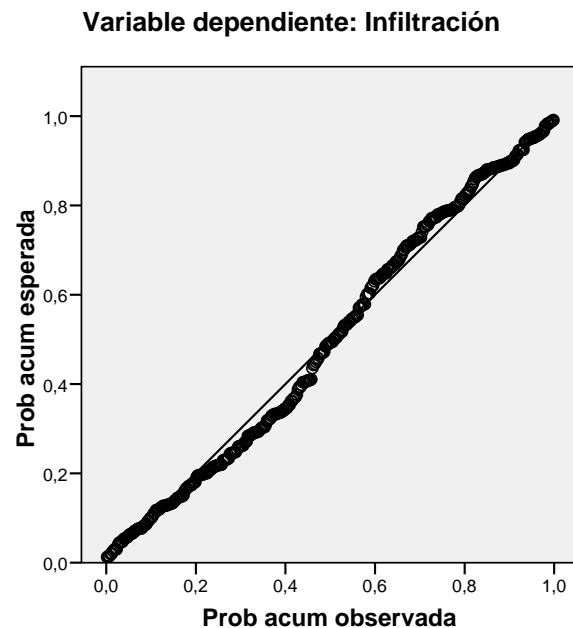


Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



En el gráfico de los residuos respecto a los valores predichos no se detectan problemas claros de heteroscedasticidad, si bien quedan patentes los rangos de las variables. Por su parte, el gráfico de dispersión de los residuos muestra que se ajustan correctamente a la diagonal, lo que indica la normalidad de los mismos.

ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	312880,332	3	104293,444	361,292	,000 ^a
	Residual	107095,691	371	288,668		
	Total	419976,023	374			

a. Variables predictoras: (Constante), Inclinación, Sedimento, Distancia cm

b. Variable dependiente: Infiltración

Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.				Beta	Limite inferior	Limite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	(Constante)	36,009	2,785	,593	12,929	,000	30,533	41,486						
	Distancia cm	1,403	,062	,593	22,621	,000	1,281	1,525	,593	,761	,593	1,000	1,000	
	Sedimento	-8,352	,456	-,480	-18,312	,000	-9,249	-7,455	-,480	-,689	-,480	1,000	1,000	
	Inclinación	-3,661	,238	-,403	-15,389	,000	-4,129	-3,193	-,403	-,624	-,403	1,000	1,000	

a. Variable dependiente: Infiltración

Revisadas las hipótesis de regresión, las variables explicativas son significativas simultáneamente al 95% ya que el test de la F de Fisher Snedecor proporciona un p-valor menor que 0,05. Todas las variables son significativas individualmente al 95% ya que los p-valoros del contraste del estadístico T son menores de 0,05. Además, se ha realizado un diagnóstico por caso no encontrándose ningún valor atípico situado a más de 3 desviaciones típicas.

Segundo modelo:

Eliminando la constante del modelo, se empeora la normalidad de los residuos y se obtiene un coeficiente de determinación de 0,814, correspondiente al modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = 1,939 \cdot \text{Distancia (cm)} - 5,278 \cdot \text{Sedimento (kg/m}^2) - 2,347 \cdot \text{Inclinación (\%)}$$

Resumen del modelo^{a,d}

Modelo	R	R cuadrado ^a	R cuadrado corregido	Error tip. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F	
1	,902 ^b	,814	,812	20,43548	,814	541,515	3	372	,000	1,182

- a. Para la regresión a través del origen (el modelo sin término de intersección), R cuadrado mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicado por la regresión a través del origen. NO SE PUEDE comparar lo anterior con la R cuadrado para los modelos que incluyen una intersección.
- b. Variables predictoras: Inclinación, Sedimento, Distancia cm
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

ANOVA^{c,d}

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	678423,892	3	226141,297	541,515	,000 ^a
	Residual	155350,418	372	417,609		
	Total	833774,310 ^b	375			

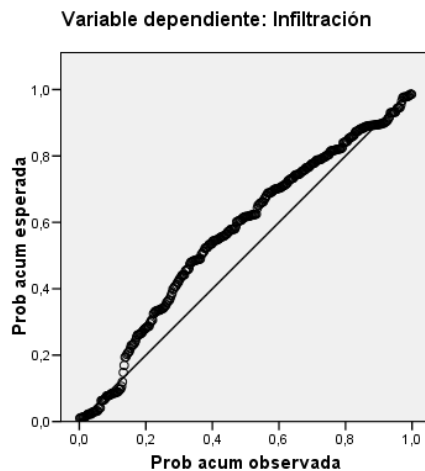
- a. Variables predictoras: Inclinación, Sedimento, Distancia cm
- b. Esta suma de cuadrados total no se ha corregido para la constante porque la constante es cero para la regresión a través del origen.
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

Coefficientes^{a,b}

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error tip.	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
		1	Distancia cm	1,939	,056	1,364	34,938	,000	1,830	2,049	,817	,875	,782
	Sedimento	-5,278	,468	-,416	-11,274	,000	-6,199	-4,357	,427	-,505	-,252	,367	2,722
	Inclinación	-2,347	,259	-,309	-9,073	,000	-2,856	-1,839	,397	-,426	-,203	,431	2,320

- a. Variable dependiente: Infiltración
- b. Regresión lineal a través del origen

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Tercer modelo:

Se plantearon diversas transformaciones de las variables (neperiano, exponencial, inversa, cuadrado y cubo) y se seleccionaron las más significativas para cada variable. Así, con el mínimo de componentes y cumpliendo todas las hipótesis de regresión, el mayor coeficiente de determinación es de 0,751, correspondiente al modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = -35,027 + 33,644 \cdot \text{Ln}(\text{Distancia (cm)}) - 1,672 \cdot (\text{Sedimento (kg/m}^2\text{)})^2 - 3,661 \cdot \text{Inclinación (\%)}$$

Resumen del modelo^b

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. del cambio en F	
1	,867 ^a	,751	,749	16,78847	,751	373,018	3	371	,000	1,442

a. Variables predictoras: (Constante), s2, LNd, Inclinación

b. Variable dependiente: Infiltración

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	315408,681	3	105136,227	373,018	,000 ^a
	Residual	104567,342	371	281,853		
	Total	419976,023	374			

a. Variables predictoras: (Constante), s2, LNd, Inclinación

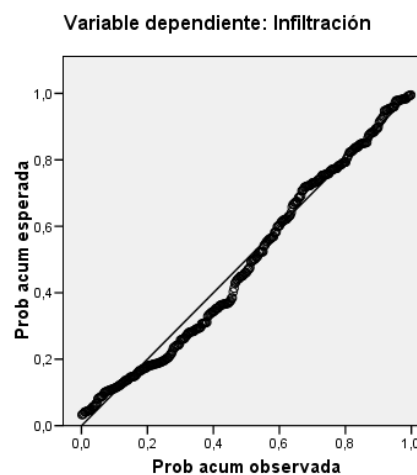
b. Variable dependiente: Infiltración

Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	-35,027	5,313		-6,593	,000	-45,475	-24,579						
	Inclinación	-3,661	,235	-,403	-15,574	,000	-4,124	-3,199	-,403	-,629	-,403	1,000	1,000	
	LNd	33,644	1,525	,571	22,059	,000	30,645	36,644	,571	,753	,571	1,000	1,000	
	s2	-1,672	,085	-,512	-19,746	,000	-1,839	-1,506	-,512	-,716	-,512	1,000	1,000	

a. Variable dependiente: Infiltración

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Cuarto modelo:

Eliminando la constante del modelo, realizando por tanto la regresión sobre el origen, se obtiene un R² de 0,860, correspondiente al modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = 24,234 \cdot \text{Ln}(\text{Distancia (cm)}) - 1,795 \cdot (\text{Sedimento (kg/m}^2\text{)})^2 - 4,004 \cdot \text{Inclinación (\%)}$$

Resumen del modelo^{a,d}

Modelo	R	R cuadrado ^a	R cuadrado corregido	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F	
1	,927 ^b	,860	,859	17,72074	,860	761,041	3	372	,000	1,403

- a. Para la regresión a través del origen (el modelo sin término de intersección), R cuadrado mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicado por la regresión a través del origen. NO SE PUEDE comparar lo anterior con la R cuadrado para los modelos que incluyen una intersección.
- b. Variables predictoras: Inclinación, s2, LNd
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

ANOVA^{c,d}

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	716957,135	3	238985,712	761,041	,000 ^a
	Residual	116817,175	372	314,025		
	Total	833774,310 ^b	375			

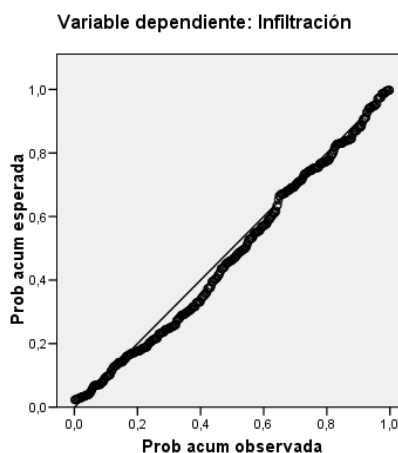
- a. Variables predictoras: Inclinación, s2, LNd
- b. Esta suma de cuadrados total no se ha corregido para la constante porque la constante es cero para la regresión a través del origen.
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

Coefficientes^{a,b}

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	LNd	24,234	,567	1,701	42,717	,000	23,119	25,350	,764	,911	,829	,238	4,209
	s2	-1,795	,087	-,655	-20,591	,000	-1,967	-1,624	,350	-,730	-,400	,372	2,689
	Inclinación	-4,004	,242	-,528	-16,547	,000	-4,480	-3,528	,397	-,651	-,321	,370	2,699

- a. Variable dependiente: Infiltración
- b. Regresión lineal a través del origen

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Quinto modelo:

Queda patente en todos los modelos anteriores que la infiltración aumenta con la distancia y disminuye con la carga de sedimento y con la inclinación. Como último recurso para mejorar el ajuste se decide combinar las tres variables explicativas consideradas para obtener dos variables que explique mejor la manera en que la carga de sedimento y la inclinación hacen disminuir la infiltración. Estas dos variables podrían ser:

- Cantidad de sedimento en kg (C): la escorrentía superficial tiene que hacer frente a una cantidad de sedimento creciente a medida que avanza. Esta cantidad creciente mantiene constante su afección negativa a la tasa de infiltración de la superficie creciente que va siendo afectada por la escorrentía. Así, por cada metro de ancho, la escorrentía que ha avanzado una distancia d (m) sobre un pavimento con una carga de sedimento s (kg/m^2), para infiltrarse tendrá que hacer frente a una cantidad total de sedimento: $C \text{ (kg)} = 1 \text{ (m)} \times \text{Distancia (m)} \times \text{Sedimento (kg}/\text{m}^2)$.
- Incremento de altura en m (H): cuanto mayor sea la inclinación mayor será el incremento de altura a medida que la escorrentía superficial vaya avanzando, mayor será la velocidad de la lámina de agua y por tanto menor la infiltración. Esta altura es una representación de la energía potencial de la lámina de agua al entrar sobre la superficie permeable. Así, para los porcentajes de inclinación ensayados se puede hacer la aproximación: $H \text{ (cm)} = \text{Distancia (m)} \times \text{Inclinación (\%)}$

Además, se decide no considerar la constante del modelo para asegurar el resultado de 0% de infiltración para la distancia de 0 m. Así, se obtiene el siguiente modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = 258,227 \cdot \text{Distancia (m)} - 28,627 \cdot C \text{ (kg)} - 10,198 \cdot H \text{ (cm)}$$

Correlaciones^a

		Infiltración	D	C	H
Productos cruzados est.	Infiltración	1,000	,817	,499	,500
	D	,817	1,000	,856	,805
	C	,499	,856	1,000	,689
	H	,500	,805	,689	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración	.	,000	,000	,000
	D	,000	.	,000	,000
	C	,000	,000	.	,000
	H	,000	,000	,000	.
N	Infiltración	375	375	375	375
	D	375	375	375	375
	C	375	375	375	375
	H	375	375	375	375

a. Los coeficientes se han calculado a través del origen.

Diagnósticos de colinealidad^{a,b}

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				D	C	H
1	1	2,568	1,000	,03	,03	,04
	2	,315	2,854	,01	,34	,66
	3	,116	4,698	,97	,63	,30

a. Variable dependiente: Infiltración

b. Regresión lineal a través del origen

Si bien las variables explicativas sí están correlacionadas entre sí (como era de esperar dado el cálculo de las mismas), no se detectan problemas de colinealidad dado que los índices de condición del diagnóstico de colinealidad son menores de 30.

Resumen del modelo^{c,d}

Modelo	R	R cuadrado ^a	R cuadrado corregido	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				Durbin-Watson	
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2		Sig. del cambio en F
1	,942 ^b	,887	,886	15,91409	,887	973,397	3	372	,000	1,140

a. Para la regresión a través del origen (el modelo sin término de intersección), R cuadrado mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicado por la regresión a través del origen. NO SE PUEDE comparar lo anterior con la R cuadrado para los modelos que incluyen una intersección.

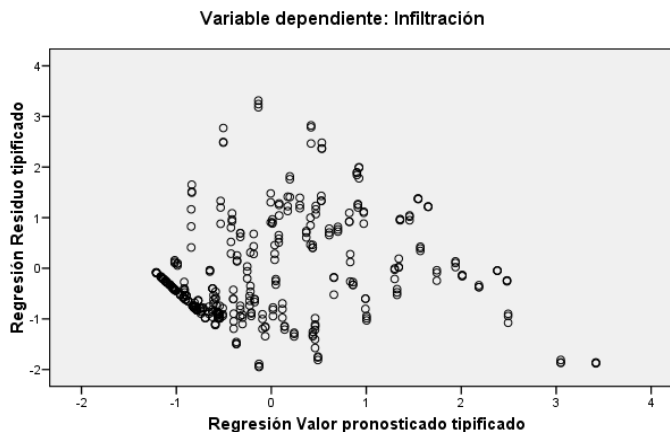
b. Variables predictoras: H, C, D

c. Variable dependiente: Infiltración

d. Regresión lineal a través del origen

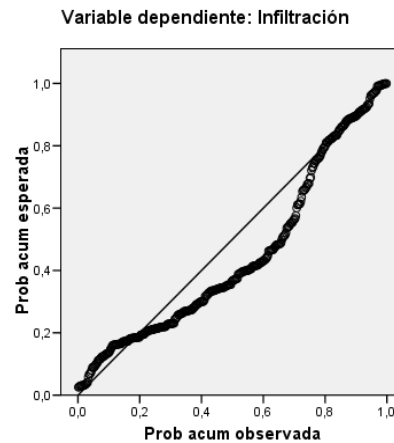
El modelo planteado tiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,887$ (el modelo explica un 88,7% de la variabilidad de los resultados mediante regresión a través del origen). El estadístico de Durbin Watson empeora ligeramente pero sigue teniendo un valor más próximo a 2 que a 0 ó a 4, lo que indica que no hay problemas de autocorrelación de los residuos.

Gráfico de dispersión



En el gráfico de los residuos respecto a los valores predichos no se detectan problemas claros de heteroscedasticidad, si bien quedan patentes los rangos de las variables.

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Por su parte, en el gráfico de dispersión de los residuos se observa un importante alejamiento de la diagonal en la parte central, lo cual indica ciertos problemas de normalidad de los residuos del modelo. Este problema puede deberse a la combinación no lineal de las variables explicativas.

ANOVA^{a,d}

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	739562,229	3	246520,743	973,397	,000 ^a
	Residual	94212,081	372	253,258		
	Total	833774,310 ^b	375			

a. Variables predictoras: H, C, D

b. Esta suma de cuadrados total no se ha corregido para la constante porque la constante es cero para la regresión a través del origen.

c. Variable dependiente: Infiltración

d. Regresión lineal a través del origen

Coeficientes^{a,b}

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	C	-28,627	1,288	-,749	-22,224	,000	-31,159	-26,094	,499	-,755	-,387	,267	3,738
	D	258,227	5,851	1,816	44,131	,000	246,721	269,733	,817	,916	,769	,179	5,577
	H	-10,198	,672	-,446	-15,178	,000	-11,519	-8,877	,500	-,618	-,265	,352	2,838

a. Variable dependiente: Infiltración

b. Regresión lineal a través del origen

Las variables explicativas son significativas simultáneamente al 95% ya que el test de la F de Fisher Snedecor proporciona un p-valor menor que 0,05. Todas las variables son significativas individualmente al 95% ya que los p-valores del contraste del estadístico T son menores de 0,05. Además, se ha realizado un diagnóstico por caso y se han encontrado tres valores atípicos situados a más de 3 desviaciones típicas correspondientes a la pendiente del

8%, y el estado de semi-colmatación al final de la probeta y por tanto probablemente asociados a las condiciones de contorno (interferencia del marco o del sellado).

Diagnósticos por caso^{a,b}

Número de caso	Residuo tip.	Infiltración	Valor pronosticado	Residuo bruto
200	3,244	82,70	31,0677	51,63228
205	3,314	83,80	31,0677	52,73228
210	3,182	81,70	31,0677	50,63228

a. Variable dependiente: Infiltración

b. Regresión lineal a través del origen

Se selecciona el cuarto modelo planteado por ser el ajuste con el coeficiente determinación más alto que mejor cumple con las hipótesis de regresión.

*MEZCLA BITUMINOSA POROSA**Ajustes del simulador de lluvia y escorrentía*

Ajuste del simulador de lluvia y escorrentía – ENSAYOS CON MEZCLA BITUMINOSA						
Nº de ensayo	Pendiente (%)	Masa de sedimento (g)	Volumen de lluvia simulada (ml/30s)	Intensidad simulada en la lluvia (mm/h)	Volumen de escorrentía simulada (ml/30s)	Intensidad simulada en la escorrentía (mm/h)
27	0	0	98,5	47,3	94,5	45,4
28	2	0	108	51,8	94	45,1
29	5	0	100	48,0	102,5	49,2
30	8	0	97,5	46,8	93,5	44,9
31	10	0	108,5	52,1	91	43,7
32	0	140	107,5	51,6	107	51,4
33	2	140	106	50,9	97	46,6
34	5	140	109,5	52,6	101,5	48,7
35	8	140	108,5	52,1	99,5	47,8
36	10	140	98,5	47,3	90,5	43,4
37	0	0	100,5	48,2	109	52,3
38	2	0	105	50,4	106	50,9
39	5	0	98	47,0	92,5	44,4
40	8	0	91	43,7	94,5	45,4
41	10	0	107	51,4	97,5	46,8
42	0	230	107,5	51,6	93	44,6
43	2	230	91,5	43,9	102	49,0
44	5	230	92	44,2	98,5	47,3
45	8	230	100	48,0	92,5	44,4
46	10	230	93,5	44,9	101	48,5
47	0	0	90,5	43,4	96,5	46,3
48	2	0	89,5	43,0	89,5	43,0
49	5	0	109	52,3	103	49,4
50	8	0	102,5	49,2	109	52,3
51	10	0	97,5	46,8	103,5	49,7

Ajuste del simulador de lluvia y escorrentía – ENSAYOS CON MEZCLA BITUMINOSA						
Nº de ensayo	Pendiente	Masa de sedimento (g)	Volumen de lluvia simulada (ml/30s)	Intensidad simulada en la lluvia (mm/h)	Volumen de escorrentía simulada (ml/30s)	Intensidad simulada en la escorrentía (mm/h)
52	0	190	93,5	44,9	96,5	46,3
53	2	190	93	44,6	108,5	52,1
54	5	190	98,5	47,3	89,5	43,0
55	8	190	93	44,6	107,5	51,6
56	10	190	105,5	50,6	109	52,3
57	0	0	107	51,4	101,5	48,7
58	2	0	92,5	44,4	106,5	51,1
59	5	0	90	43,2	95	45,6
60	8	0	106	50,9	93,5	44,9
61	10	0	98,5	47,3	91,5	43,9
62	0	500	100,5	48,2	95,5	45,8
63	2	500	100,5	48,2	100,5	48,2
64	5	500	102	49,0	107	51,4
65	8	500	93,5	44,9	105	50,4
66	10	500	102,5	49,2	89	42,7
67	0	0	95,5	45,8	90,5	43,4
68	2	0	106,5	51,1	107,5	51,6
69	5	0	108,5	52,1	93,5	44,9
70	10	0	93	44,6	96	46,1
71	8	0	100,5	48,2	106,5	51,1
72	0	500	107,5	51,6	104	49,9
73	2	500	96	46,1	88,5	42,5
74	5	500	100,5	48,2	108	51,8
75	8	500	102,5	49,2	105,5	50,6
76	10	500	94,5	45,4	109,5	52,6
77	0	0	106,5	51,1	95	45,6
78	2	0	95	45,6	103	49,4
79	5	0	99,5	47,8	102	49,0
80	8	0	96	46,1	94,5	45,4
81	10	0	93	44,6	95	45,6
82	0	500	94	45,1	108,5	52,1
83	2	500	104,5	50,2	97	46,6
84	5	500	107,5	51,6	99,5	47,8
85	8	500	99	47,5	102	49,0
86	10	500	95	45,6	98,5	47,3

Resultados de los ensayos

N° de ensayo	N° de repetición	MASA DE AGUA RECOGIDA (g) – ENSAYOS CON MEZCLA BITUMINOSA						
		Infiltrado durante empape	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
27	1	2098,0	1627,0	2467,0	1737,0	575,5	10,5	13,0
27	2	3418,0	1415,0	2719,5	2046,0	530,5	2,5	125,0
27	3	3379,0	1549,0	2699,0	1994,5	567,0	2,0	102,5
28	1	3107,5	1169,5	1593,5	2135,5	1842,5	542,0	264,0
28	2	3689,5	990,5	1492,5	2307,0	2125,0	477,5	276,5
28	3	3665,0	888,5	1524,5	2295,0	2096,0	593,0	321,0
29	1	3352,0	52,0	1038,5	1801,5	2059,0	2354,5	288,5
29	2	3743,5	243,0	1006,0	1781,5	2158,0	2342,0	310,5
29	3	3751,0	196,0	1059,0	1872,0	2185,0	2206,0	404,5
30	1	3412,5	5,0	405,5	1515,5	1226,0	4730,5	329,0
30	2	4060,0	7,0	482,0	1542,5	1391,0	4688,0	378,5
30	3	4033,5	5,0	286,5	1590,0	1409,5	4828,0	399,5
31	1	3159,0	16,0	70,0	1059,0	403,5	5284,0	681,0
31	2	3373,5	34,0	2,0	1057,0	604,0	5113,5	620,5
31	3	3304,0	10,0	1,0	1006,0	653,5	4989,0	725,0
32	1	3312,0	2811,0	1613,0	2707,5	652,0	1,5	85,0
32	2	3870,0	2607,0	1833,0	2702,0	569,0	1,5	73,0
32	3	3803,5	2718,0	1793,0	2641,5	557,0	1,5	85,0
33	1	3161,0	1273,0	1175,5	2874,5	4693,0	136,5	109,0
33	2	3532,5	893,5	1412,5	2847,5	4813,0	118,5	153,5
33	3	3417,0	774,0	1183,5	3323,0	1358,0	182,0	153,5
34	1	3501,0	249,5	951,0	2840,5	1637,0	2080,5	364,5
34	2	3876,5	223,0	808,0	2750,0	1919,5	1986,0	420,5
34	3	3830,5	171,5	638,5	2551,5	1831,5	2358,0	407,0
35	1	3749,5	124,0	489,0	2340,5	1730,0	3828,5	287,0
35	2	4338,5	12,5	345,5	2424,0	1797,0	4049,0	397,0
35	3	4297,5	8,0	173,0	2479,5	1954,0	3951,5	482,5
36	1	3137,5	14,5	84,5	1560,0	814,0	4474,5	573,5
36	2	3466,0	13,0	132,0	1605,5	855,0	4221,5	690,5
36	3	3411,5	12,0	134,5	1571,5	826,5	4241,0	699,5
37	1	2695,5	3306,5	968,0	2272,0	1048,0	7,0	312,0
37	2	3850,0	3129,0	1052,5	2473,0	1132,5	2,0	385,0
37	3	3944,0	2947,5	1407,5	2642,5	1255,5	5,0	292,5

Nº de ensayo	Nº de repetición	MASA DE AGUA RECOGIDA (g) – ENSAYOS CON MEZCLA BITUMINOSA						
		Infiltrado durante empape	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
38	1	3522,0	1923,0	780,5	2857,0	1789,0	193,0	623,0
38	2	3798,5	1882,0	745,0	2985,0	1860,0	195,5	562,5
38	3	3820,0	1589,5	824,0	3094,0	2006,5	138,0	576,5
39	1	3282,0	277,0	486,0	2556,5	2481,0	1233,0	498,5
39	2	3557,5	172,5	534,0	2591,5	2482,5	1282,5	519,0
39	3	3484,0	100,0	490,0	2535,5	2561,5	1300,5	579,5
40	1	2854,0	45,0	130,0	1598,5	1825,5	2748,5	434,5
40	2	3146,5	2,5	41,5	1624,0	1837,0	2654,5	663,0
40	3	3046,0	0,0	1,0	1647,0	1674,0	2738,0	686,5
41	1	3716,5	1,5	22,5	1388,5	1824,5	4193,0	888,0
41	2	3748,0	13,5	2,5	1328,5	1886,5	4193,0	1044,0
41	3	3707,0	13,0	1,0	1213,0	1736,5	4271,5	1244,0
42	1	2906,5	2363,5	828,5	2346,0	856,0	71,5	279,5
42	2	3210,0	2358,5	895,5	2437,5	721,5	15,5	363,5
42	3	3269,5	2255,5	953,0	2379,5	845,5	110,5	223,0
43	1	3292,0	2196,5	857,0	2141,5	1590,5	227,5	470,0
43	2	3475,0	1976,0	979,0	2163,0	1718,5	192,0	441,0
43	3	3520,5	1832,5	1014,0	2242,0	1732,5	236,0	444,0
44	1	2880,0	453,5	524,0	2017,5	2340,0	964,5	785,5
44	2	3183,0	407,5	543,5	1972,5	2481,0	981,5	770,0
44	3	3190,0	374,5	657,0	1977,5	2456,5	966,0	789,5
45	1	2931,0	383,5	347,0	1851,5	1771,0	2055,0	679,0
45	2	3192,5	285,5	228,5	1823,0	1966,5	2201,5	595,5
45	3	3201,5	303,0	236,0	1702,0	1992,0	2166,5	621,5
46	1	2750,5	154,5	111,5	1503,5	1602,5	2815,5	986,0
46	2	3123,0	18,5	95,0	1625,0	1729,0	2805,5	894,5
46	3	3105,5	3,5	36,5	1474,0	1728,5	2949,5	912,5
47	1	2325,5	3082,5	984,0	1379,0	585,0	2,0	4,5
47	2	3087,0	2465,0	1079,0	1961,0	766,5	2,5	14,5
47	3	3148,0	2774,5	1020,0	1900,5	605,0	2,5	17,0
48	1	2990,0	1899,5	699,0	2626,5	1430,5	47,0	85,5
48	2	3183,0	1509,0	771,0	2772,5	1209,0	140,0	83,0
48	3	3165,0	1345,0	906,0	2748,5	1214,5	170,0	98,0
49	1	4444,0	908,5	828,5	2701,5	2197,0	1786,0	506,0
49	2	4317,5	620,0	838,5	2881,5	2630,5	1737,5	541,0
49	3	4230,5	751,5	491,0	2563,0	2664,5	2000,5	633,0

N° de ensayo	N° de repetición	MASA DE AGUA RECOGIDA (g) – ENSAYOS CON MEZCLA BITUMINOSA						
		Infiltrado durante empape	Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
50	1	3471,5	256,0	333,5	2095,5	1614,0	3031,5	549,5
50	2	3767,0	48,0	275,5	2271,0	1498,5	3229,5	592,0
50	3	3610,5	9,5	106,0	2148,0	1496,5	3309,5	864,0
51	1	3212,5	9,0	3,0	2071,0	1168,5	3551,5	596,5
51	2	3413,0	7,0	16,5	2155,5	1163,0	3681,0	353,5
51	3	3512,0	5,5	4,5	2271,5	1075,5	3692,5	318,0
52	1	3013,5	2708,5	1208,0	2305,5	341,0	2,5	2,0
52	2	3363,0	2742,0	1255,0	2401,5	326,5	2,5	2,0
52	3	3341,0	3030,0	1170,0	2171,5	283,5	2,1	2,0
53	1	3372,0	1461,0	1308,0	2695,0	1446,5	110,5	190,5
53	2	3532,0	1299,0	1310,0	2753,5	1521,5	95,5	274,0
53	3	3505,0	1171,0	1374,0	2803,0	1568,0	150,5	323,5
54	1	3074,5	498,5	1266,0	2249,5	1769,5	885,0	175,0
54	2	3382,0	726,0	1263,0	2130,5	1710,0	802,5	177,0
54	3	3228,0	772,0	1274,0	2030,5	1591,0	713,5	384,0
55	1	3388,0	4,5	534,0	2503,5	1650,5	2479,0	297,0
55	2	3579,5	3,0	444,5	2192,5	1774,0	2677,5	306,5
55	3	3540,0	2,5	387,0	2140,0	1765,0	2671,0	386,5
56	1	3776,0	21,0	561,5	2515,0	1560,0	3639,0	484,5
56	2	4210,5	44,5	541,5	2725,5	1622,0	3614,0	485,0
56	3	4301,0	27,0	422,0	2712,5	1693,5	3685,5	585,5

AGUA RECOGIDA EN CADA CONTENEDOR (1/3)								
N°	Medida	Pesos Agua [gr] por contenedor						
		0	1	2	3	4	5	6
57	1	2984,5	2387,5	2682,0	4483,5	2757,0	1416,0	1419,0
57	2	4180,0	2936,0	2552,5	4807,5	2618,0	1410,0	1430,0
57	3	4400,5	3548,5	2552,5	4603,5	2446,5	1410,0	1463,0
58	1	3556,5	2839,5	2114,5	4219,0	2876,0	1596,0	1966,0
58	2	3944,0	3018,0	2169,5	4210,0	2764,0	1597,0	1907,5
58	3	3906,5	3002,0	2106,5	4177,0	2793,5	1567,0	1899,5
59	1	3478,0	2446,5	1803,5	3797,0	2771,5	2599,5	1781,0
59	2	3627,0	2073,0	1722,0	3775,5	2842,0	2624,0	2024,0
59	3	3606,0	1935,5	1676,0	3828,5	2844,5	2584,0	2113,0
60	1	3819,5	2228,0	1594,5	2956,0	2349,5	4397,0	2375,0
60	2	3849,0	1998,0	1617,0	3105,5	2501,5	4347,5	2359,0
60	3	3835,0	1878,0	1602,5	3053,0	2610,5	4307,5	2455,5
61	1	3515,0	1904,5	1606,0	2278,0	2321,0	4788,5	2503,0
61	2	3543,5	1567,5	1649,5	2416,5	2475,5	4802,5	2442,0
61	3	3493,0	1488,5	1523,5	2647,0	2481,0	4733,5	2398,0
62	1	3437,5	2878,5	2212,5	3114,5	2564,5	1423,5	2223,0
62	2	3356,5	2632,5	2081,5	2983,5	2618,0	1417,5	2435,0
62	3	3341,0	2598,5	2104,0	2985,0	2579,0	1432,5	2459,5
63	1	2954,5	1992,0	1693,0	3233,0	3186,5	1654,5	3988,0
63	2	3129,0	1983,5	1628,5	3228,0	3410,5	1889,0	3510,0
63	3	3122,0	1954,5	1672,0	3113,0	3380,5	1787,5	3691,5
64	1	3142,0	1722,0	1725,5	3398,5	3246,5	2578,0	3960,5
64	2	3263,0	1626,0	1622,5	3110,5	3170,0	2612,5	4579,5
64	3	2946,5	1593,5	1727,5	3090,5	2925,5	2351,0	4980,5
65	1	3035,5	1619,5	1504,0	3011,5	2844,5	3667,5	3026,5
65	2	3288,5	1581,0	1433,5	2784,5	2760,5	3630,0	3436,5
65	3	3110,5	1529,5	1383,0	2627,0	2746,5	3702,0	3620,5
66	1	3154,5	1550,0	1480,5	2653,0	2448,0	4787,5	2841,0
66	2	3522,0	1512,0	1388,0	2621,0	2725,0	4494,0	3038,0
66	3	3430,0	1436,5	1381,5	2499,5	2655,0	4703,0	3111,5
67	1	3171,0	3708,5	2992,5	3897,5	1961,5	1414,0	1611,5
67	2	4078,5	3422,5	3000,0	4158,5	2164,5	1411,0	1530,0
67	3	3900,0	2546,0	3162,0	4157,0	2090,5	1411,0	1728,0
68	1	3805,0	2193,5	2375,0	4143,0	3100,5	1474,5	2460,5
68	2	3576,5	1849,5	2344,0	3962,0	3054,0	1481,0	2692,0
68	3	3370,5	1782,5	2326,0	4044,5	3123,0	1478,5	2983,5

AGUA RECOGIDA EN CADA CONTENEDOR (2/3)								
N°	Medida	Pesos Agua [gr] por contenedor						
		0	1	2	3	4	5	6
69	1	3925,0	1840,5	1609,0	2767,5	4892,0	3093,0	2551,0
69	2	4086,5	1471,0	1556,0	2697,0	4870,5	3105,5	3061,0
69	3	4066,5	1484,0	1660,5	3074,0	4938,5	3058,5	2625,5
70	1	3484,0	1390,5	1382,0	1405,0	2894,5	5451,5	3265,0
70	2	3305,5	1430,5	1381,5	1459,0	3024,5	5807,5	2799,0
70	3	3469,0	1410,5	1381,5	1424,5	2930,5	5636,5	2915,5
71	1	3976,5	1420,5	1382,5	2269,5	4531,5	4856,5	2664,5
71	2	4189,5	1395,0	1393,0	2260,0	4157,5	4879,0	3119,0
71	3	4101,5	1393,0	1382,0	2298,5	4475,0	5276,0	3653,0
72	1	2604,5	2751,5	2328,0	3254,5	2375,0	1409,0	3751,0
72	2	2905,5	2694,0	2103,5	3071,5	2185,0	1409,5	3833,5
72	3	2811,0	2713,5	2026,0	3063,5	2069,5	1409,5	4041,0
73	1	2693,0	1665,5	1939,0	3193,0	3123,5	1717,5	3111,0
73	2	2974,0	1458,5	1877,0	3233,5	3460,0	1555,5	3592,0
73	3	2810,5	1398,5	1793,5	3260,5	3288,5	1490,0	3768,5
74	1	2618,0	1389,0	1382,0	1734,5	3579,5	3421,6	3421,5
74	2	2756,0	1387,5	1381,5	1848,5	3530,5	3187,0	3187,0
74	3	2492,0	1387,0	1381,5	1681,0	3344,5	2859,5	2859,5
75	1	3395,0	1387,0	1422,0	1935,5	3937,0	4681,5	3332,0
75	2	3684,5	1387,0	1381,5	1576,0	4135,5	4473,0	3883,0
75	3	3488,0	1387,0	1381,5	1386,5	3758,0	4438,0	4513,5
76	1	2790,0	1401,0	1382,0	1503,5	2859,5	5005,5	4659,5
76	2	3076,5	1395,5	1381,5	1381,5	2412,5	4918,5	5452,0
76	3	2743,0	1392,0	1381,5	1379,5	2381,0	2381,0	5962,5
77	1	2755,5	3273,0	2324,0	4054,0	2608,0	1429,0	1635,0
77	2	4060,5	3196,5	2383,5	4235,5	2525,5	1411,0	1796,0
77	3	3960,5	3062,5	2305,0	4295,0	2476,5	1410,5	2017,0
78	1	3643,5	2810,5	1970,5	4318,0	3175,0	1523,0	1546,0
78	2	4001,5	2763,5	1864,5	4367,0	3214,0	1656,5	1588,0
78	3	4011,5	2425,5	2025,5	4443,0	3237,0	1692,5	1581,5
79	1	3705,0	1978,5	1579,5	3331,5	4007,5	2793,5	1945,5
79	2	3859,0	1997,5	1491,5	3292,5	4086,5	2726,5	1991,5
79	3	3858,5	1747,0	1421,5	3451,5	4113,0	2838,5	1799,0
80	1	3534,5	1422,0	1381,5	2111,5	3944,0	4262,0	2557,5
80	2	3515,0	1414,0	1381,5	1930,5	3793,5	4458,5	2718,0
80	3	3572,0	1403,0	1381,5	1873,5	3824,0	4314,5	2784,5

AGUA RECOGIDA EN CADA CONTENEDOR (3/3)								
N°	Medida	Pesos Agua [gr] por contenedor						
		0	1	2	3	4	5	6
81	1	3590,0	1395,5	1381,5	1712,0	3551,5	5233,0	2546,5
81	2	3709,5	1396,0	1381,5	1838,0	3362,5	5233,5	2613,0
81	3	3809,5	1399,5	1381,5	1763,0	3320,0	5528,5	2687,5
82	1	2625,5	2817,5	2249,5	3253,5	2386,5	1415,0	3345,5
82	2	2941,0	2708,0	2132,0	3191,5	5152,0	1410,0	3705,5
82	3	2856,0	2540,0	2242,0	3199,5	2058,0	1410,5	4001,0
83	1	2196,5	1662,0	1634,5	3137,0	2737,5	1895,5	4617,5
83	2	2477,5	1621,0	1564,0	3342,0	2680,0	1891,5	4632,5
83	3	2539,5	1550,5	1538,5	3142,5	2580,5	1749,0	5042,5
84	1	3280,5	1538,0	1532,5	2952,0	2968,0	3068,0	3161,5
84	2	3537,5	1475,0	1482,5	2720,0	3827,5	3027,5	3662,0
84	3	3353,0	1389,0	1424,5	2641,0	4038,5	3005,0	3884,5
85	1	3454,0	1389,5	1381,5	1729,5	4268,5	4429,5	2653,0
85	2	3774,5	1387,5	1381,5	1705,5	4166,5	4565,0	2732,5
85	3	3612,0	1387,0	1381,5	1789,0	4238,0	5154,0	3087,5
86	1	3070,5	1388,0	1391,0	1949,0	3285,5	4403,0	3070,5
86	2	3306,0	1390,0	1381,5	2060,5	3315,5	4399,0	2855,5
86	3	3352,5	1388,5	1381,5	1962,5	3342,0	4602,0	2926,5

Análisis de regresión

El número de valores disponibles en el caso del ensayo de resistencia a la colmatación de pavimentos permeables de mezcla bituminosa porosa es de 900. Estos valores han sido obtenidos de la medición del valor de infiltración en 5 distancias, con 2 cargas de sedimento para cada una de las 6 probetas y 5 inclinaciones, repitiendo 3 veces cada medida ($5 \times 2 \times 6 \times 5 \times 3 = 900$).

El objetivo de este análisis es expresar los resultados del agua infiltrada, en %, en función de las siguientes variables deterministas:

- Distancia respecto a la línea de aportación de escorrentía superficial en cm.
- Carga de sedimento que soporta la superficie en kg/m^2 .
- Inclinación de la superficie en %.
- Huecos de la mezcla en %.

El programa empleado para el estudio estadístico ha sido el SPSS-15. Y se fija desde un inicio que la regresión planteada debe cumplir las siguientes hipótesis:

- Independencia o no multicolinealidad de las variables explicativas.
- No autocorrelación o covarianza nula de los residuos del modelo.
- Homoscedasticidad o varianza constante de los residuos del modelo.
- Normalidad de los residuos del modelo.

Primer modelo:

Como primer paso se plantea la regresión lineal obteniendo el siguiente modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = -46,928 + 2,004 \cdot \text{Distancia (cm)} - 6,497 \cdot \text{Sedimento (kg/m}^2) - 3,887 \cdot \text{Inclinación (\%)} + 1,870 \cdot \text{Huecos (\%)}$$

Correlaciones

		Infiltración	Distancia	Sedimento	Inclinación	Huecos
Correlación de Pearson	Infiltración	1,000	,814	-,172	-,411	,128
	Distancia	,814	1,000	,000	,000	,000
	Sedimento	-,172	,000	1,000	,000	-,189
	Inclinación	-,411	,000	,000	1,000	,000
	Huecos	,128	,000	-,189	,000	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración	.	,000	,000	,000	,000
	Distancia	,000	.	,500	,500	,500
	Sedimento	,000	,500	.	,500	,000
	Inclinación	,000	,500	,500	.	,500
	Huecos	,000	,500	,000	,500	.
N	Infiltración	900	900	900	900	900
	Distancia	900	900	900	900	900
	Sedimento	900	900	900	900	900
	Inclinación	900	900	900	900	900
	Huecos	900	900	900	900	900

Diagnósticos de colinealidad^a

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de la varianza				
				(Constante)	Distancia	Sedimento	Inclinación	Huecos
1	1	4,042	1,000	,00	,01	,02	,02	,00
	2	,542	2,731	,00	,01	,89	,06	,00
	3	,297	3,691	,00	,13	,03	,83	,00
	4	,118	5,856	,01	,85	,02	,10	,01
	5	,002	46,638	,99	,00	,05	,00	,99

a. Variable dependiente: Infiltración

Las variables explicativas son independientes, salvo huecos y sedimento que muestran una cierta correlación. Además, en el diagnóstico de colinealidad se detectan problemas de colinealidad al registrarse un valor del índice de condición mayor de 30.

Resumen del modelo^b

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. del cambio en F	
1	,933 ^a	,870	,870	12,58331	,870	1501,012	4	895	,000	1,306

a. Variables predictoras: (Constante), Huecos, Inclinación, Distancia, Sedimento

b. Variable dependiente: Infiltración

El modelo planteado tiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,870$ (el modelo explica un 87,0% de la variabilidad de los resultados). Por su parte, el estadístico de Durbin Watson tiene un valor más próximo a 2 que a 0 ó a 4, lo que indica que no hay problemas de autocorrelación de los residuos. Además, se ha realizado un diagnóstico por caso no encontrándose ningún valor atípico situado a más de 3 desviaciones típicas.

Gráfico de dispersión

Variable dependiente: Infiltración

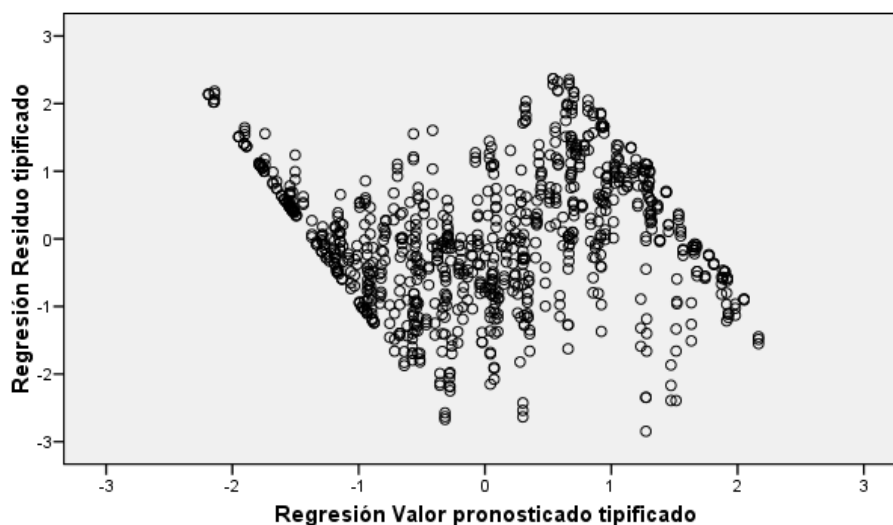
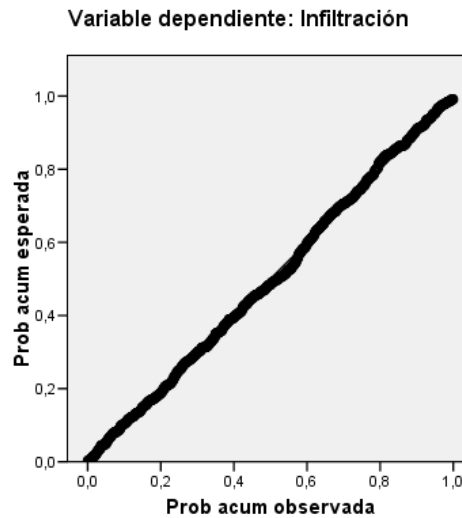


Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



En el gráfico de los residuos respecto a los valores predichos no se detectan problemas de heteroscedasticidad, si bien quedan patentes los rangos de las variables. Por su parte, el gráfico de dispersión de los residuos muestra que se ajustan correctamente a la diagonal, lo que indica la normalidad de los mismos.

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	950678,826	4	237669,706	1501,012	,000 ^a
	Residual	141714,020	895	158,340		
	Total	1092392,8	899			

a. Variables predictoras: (Constante), Huecos, Inclínación, Distancia, Sedimento

b. Variable dependiente: Infiltración

Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	(Constante)	-46,928	6,982		-6,721	,000	-60,632	-33,224					
	Distancia	2,004	,030	,814	67,580	,000	1,946	2,063	,814	,914	,814	1,000	1,000
	Sedimento	-6,497	,521	-,153	-12,480	,000	-7,518	-5,475	-,172	-,385	-,150	,964	1,037
	Inclínación	-3,887	,114	-,411	-34,178	,000	-4,111	-3,864	-,411	-,752	-,411	1,000	1,000
	Huecos	1,870	,231	,099	8,083	,000	1,416	2,324	,128	,261	,097	,964	1,037

a. Variable dependiente: Infiltración

Las variables explicativas son significativas simultáneamente al 95% ya que el test de la F de Fisher Snedecor proporciona un p-valor menor que 0,05. Todas las variables son significativas individualmente al 95% ya que los p-valores del contraste del estadístico T son menores de 0,05. Sin embargo la variable huecos ha causado problemas de colinealidad y presenta unos valores del coeficiente estandarizado y del estadístico t muy bajos en comparación con el resto. En esta línea, se puede considerar que la constante también aporta poco a la explicación de los resultados dado que presenta un valor del estadístico t aún menor en valor absoluto que el de la variable huecos.

Segundo modelo:

Eliminando la variable huecos y la constante del modelo se obtiene un coeficiente de determinación de 0,944, correspondiente al modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = 2,166 \cdot \text{Distancia (m)} - 6,190 \cdot \text{Sedimento (kg/m}^2\text{)} - 3,490 \cdot \text{Inclinación (\%)}$$

Resumen del modelo^{c,d}

Modelo	R	R cuadrado ^a	R cuadrado corregido	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				Durbin-Watson	
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2		Sig. del cambio en F
1	,972 ^b	,944	,944	13,37660	,944	5037,060	3	897	,000	1,268

- a. Para la regresión a través del origen (el modelo sin término de intersección), R cuadrado mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicado por la regresión a través del origen. NO SE PUEDE compararlo anterior con la R cuadrado para los modelos que incluyen una intersección.
- b. Variables predictoras: Inclinación, Sedimento, Distancia
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

ANOVA^{c,d}

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2703894,3	3	901298,104	5037,060	,000 ^a
	Residual	160503,228	897	178,933		
	Total	2864397,5 ^b	900			

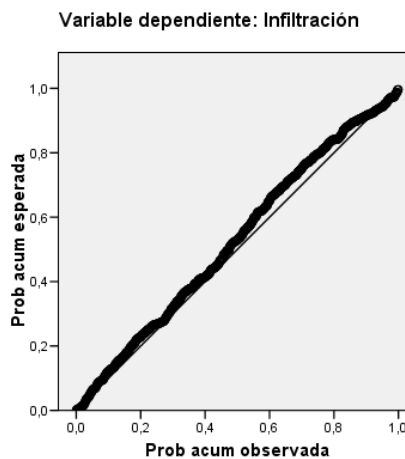
- a. Variables predictoras: Inclinación, Sedimento, Distancia
- b. Esta suma de cuadrados total no se ha corregido para la constante porque la constante es cero para la regresión a través del origen.
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

Coefficientes^{a,b}

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	Distancia	2,166	,021	1,274	103,565	,000	2,125	2,207	,926	,961	,819	,413	2,421
	Sedimento	-6,190	,519	-,117	-11,922	,000	-7,209	-5,171	,423	-,370	-,094	,844	1,552
	Inclinación	-3,490	,106	-,384	-32,868	,000	-3,699	-3,282	,482	-,739	-,260	,457	2,189

- a. Variable dependiente: Infiltración
- b. Regresión lineal a través del origen

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Tercer modelo:

Si se plantean diversas transformaciones de las variables (neperiano, exponencial, inversa, cuadrado y cubo) y se seleccionan las más significativas para cada variable, con el mínimo de componentes y cumpliendo todas las hipótesis de regresión, el coeficiente de determinación es menor, con un valor de 0,902, correspondiente al modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = 26,292 \cdot \text{Ln}(\text{Distancia (cm)}) - 341,122 \cdot 1/(\text{Distancia (cm)}) - 4,025 \cdot \text{Sedimento (kg/m}^2) - 7,673 \cdot \text{Inclinación (\%)}$$

Resumen del modelo^{c,d}

Modelo	R	R cuadrado ^a	R cuadrado corregido	Error tip. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F	
1	,950 ^b	,902	,902	17,65906	,902	2072,350	4	896	,000	1,331

a. Para la regresión a través del origen (el modelo sin término de intersección), R cuadrado mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicado por la regresión a través del origen. NO SE PUEDE comparar lo anterior con la R cuadrado para los modelos que incluyen una intersección.

b. Variables predictoras: Sedimento, Inclinación, INVd, LNd

c. Variable dependiente: Infiltración

d. Regresión lineal a través del origen

ANOVA^{c,d}

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2584986,8	4	646246,688	2072,350	,000 ^a
	Residual	279410,788	896	311,842		
	Total	2864397,5 ^b	900			

a. Variables predictoras: Sedimento, Inclinación, INVd, LNd

b. Esta suma de cuadrados total no se ha corregido para la constante porque la constante es cero para la regresión a través del origen.

c. Variable dependiente: Infiltración

d. Regresión lineal a través del origen

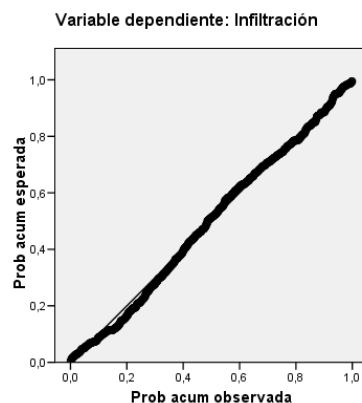
Coeficientes^{a,b}

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error tip.	Beta				Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	LNd	26,292	,348	1,542	75,476	,000	25,609	26,976	,856	,930	,788	,261	3,835	
	INVd	-341,122	16,795	-,327	-20,311	,000	-374,085	-308,160	,437	-,561	-,212	,420	2,383	
	Inclinación	-4,025	,159	-,443	-25,235	,000	-4,338	-3,712	,482	-,645	-,263	,353	2,834	
	Sedimento	-7,673	,717	-,146	-10,699	,000	-9,080	-6,265	,423	-,337	-,112	,588	1,699	

a. Variable dependiente: Infiltración

b. Regresión lineal a través del origen

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Cuarto modelo:

A continuación se decide eliminar la variable inversa de la distancia y sustituir el la carga de sedimento por su cuadrado para obtener un modelo semejante al cuarto modelo obtenido con adoquines. Así, se obtiene un coeficiente de determinación de 0,860, correspondiente al modelo:

$$\text{Infiltración (\%)} = 23,403 \cdot \text{Ln}(\text{Distancia (cm)}) - 5,095 \cdot (\text{Sedimento (kg/m}^2\text{)})^2 - 4,749 \cdot \text{Inclinación (\%)}$$

Resumen del modelo^{c,d}

Modelo	R	R cuadrado ^a	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F	
1	,928 ^b	,860	,860	21,11136	,860	1843,296	3	897	,000	1,435

- a. Para la regresión a través del origen (el modelo sin término de intersección), R cuadrado mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicado por la regresión a través del origen. NO SE PUEDE comparar lo anterior con la R cuadrado para los modelos que incluyen una intersección.
- b. Variables predictoras: s2, Inclinación, LNd
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

ANOVA^{c,d}

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2464613,9	3	821537,956	1843,296	,000 ^a
	Residual	399783,673	897	445,690		
	Total	2864397,5 ^b	900			

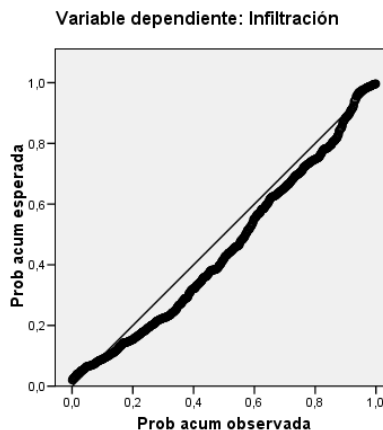
- a. Variables predictoras: s2, Inclinación, LNd
- b. Esta suma de cuadrados total no se ha corregido para la constante porque la constante es cero para la regresión a través del origen.
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

Coefficientes^{a,b}

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta				Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
		1	LNd	23,403	,374			1,373	62,529	,000	22,668	24,138	,856	,902
	Inclinación	-4,749	,186	-,523	-25,546	,000	-5,114	-4,384	,482	-,649	-,319	,371	2,694	
	s2	-5,095	,419	-,183	-12,162	,000	-5,917	-4,273	,344	-,376	-,152	,689	1,451	

- a. Variable dependiente: Infiltración
- b. Regresión lineal a través del origen

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Quinto modelo:

En los modelos anteriores se observaba como la infiltración aumenta con la distancia y el porcentaje de huecos de la mezcla y disminuye con la carga de sedimento y con la inclinación. Dado que las transformaciones realizadas no son capaces de mejorar el modelo se prueba a combinar las variables del mismo modo que se hizo en el caso del análisis de regresión de la superficie de adoquines con ranuras elípticas:

- Cantidad de sedimento en kg (C): la escorrentía superficial tiene que hacer frente a una cantidad de sedimento creciente a medida que avanza. Esta cantidad creciente mantiene constante su afección negativa a la tasa de infiltración de la superficie creciente que va siendo afectada por la escorrentía. Así, por cada metro de ancho, la escorrentía que ha avanzado una distancia d (m) sobre un pavimento con una carga de sedimento s (kg/m^2), para infiltrarse tendrá que hacer frente a una cantidad total de sedimento: $C \text{ (kg)} = 1 \text{ (m)} \times \text{Distancia (m)} \times \text{Sedimento (kg}/\text{m}^2)$.
- Incremento de altura en m (H): cuanto mayor sea la inclinación mayor será el incremento de altura a medida que la escorrentía superficial vaya avanzando, mayor será la velocidad de la lámina de agua y por tanto menor la infiltración. Esta altura es una representación de la energía potencial de la lámina de agua al entrar sobre la superficie permeable. Así, para los porcentajes de inclinación ensayados se puede hacer la aproximación: $H \text{ (cm)} = \text{Distancia (m)} \times \text{Inclinación (\%)}$

Manteniendo la constante fuera del modelo para asegurar el 0% de infiltración para la distancia de 0 m, el modelo resultante para el pavimento de mezcla bituminosa sería:

$$\text{Infiltración (\%)} = 224,213 \cdot \text{Distancia (m)} - 23,405 \cdot C \text{ (kg)} - 0,101 \cdot H \text{ (cm)}$$

Correlaciones^a

		Infiltración	D	C	H
Productos cruzados est.	Infiltración	1,000	,926	,507	,615
	D	,926	1,000	,642	,805
	C	,507	,642	1,000	,516
	H	,615	,805	,516	1,000
Sig. (unilateral)	Infiltración	.	,000	,000	,000
	D	,000	.	,000	,000
	C	,000	,000	.	,000
	H	,000	,000	,000	.
N	Infiltración	900	900	900	900
	D	900	900	900	900
	C	900	900	900	900
	H	900	900	900	900

a. Los coeficientes se han calculado a través del origen.

Diagnósticos de colinealidad^{a,b}

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de la varianza		
				D	C	H
1	1	2,316	1,000	,05	,07	,05
	2	,508	2,135	,02	,78	,20
	3	,176	3,626	,93	,15	,75

- a. Variable dependiente: Infiltración
- b. Regresión lineal a través del origen

Si bien las variables explicativas sí están correlacionadas entre sí (como era de esperar dado el cálculo de las mismas), no se detectan problemas de colinealidad dado que los índices de condición del diagnóstico de colinealidad son menores de 30.

Resumen del modelo^{c,d}

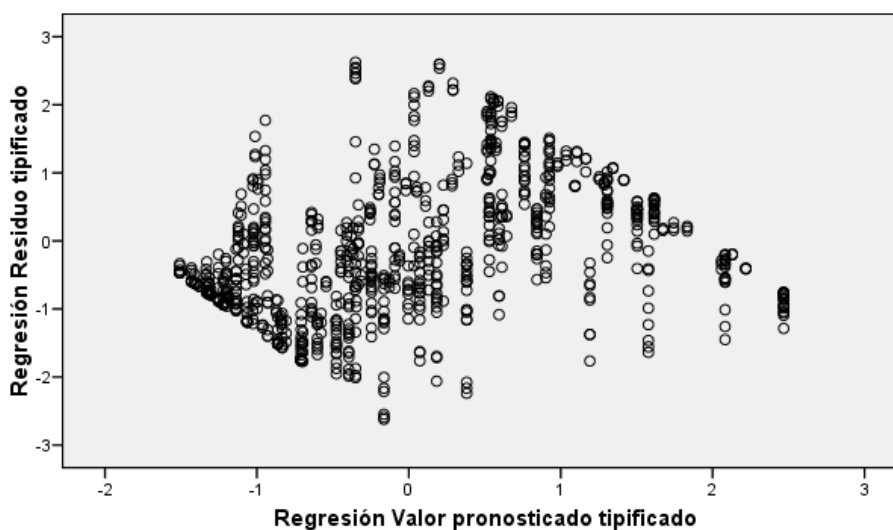
Modelo	R	R cuadrado ^a	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F	
1	,958 ^b	,918	,918	16,18672	,918	3345,134	3	897	,000	1,265

- a. Para la regresión a través del origen (el modelo sin término de intersección), R cuadrado mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicado por la regresión a través del origen. NO SE PUEDE comparar lo anterior con la R cuadrado para los modelos que incluyen una intersección.
- b. Variables predictoras: H, C, D
- c. Variable dependiente: Infiltración
- d. Regresión lineal a través del origen

El estadístico de Durbin Watson empeora ligeramente pero sigue teniendo un valor más próximo a 2 que a 0 ó a 4, lo que indica que no hay problemas de autocorrelación de los residuos.

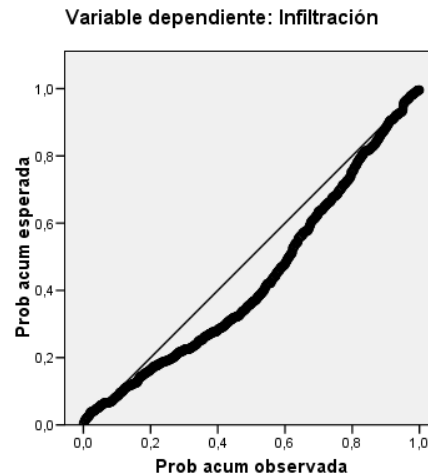
Gráfico de dispersión

Variable dependiente: Infiltración



En el gráfico de los residuos respecto a los valores predichos no se detectan problemas claros de heteroscedasticidad, si bien existen ciertas tendencias.

Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado



Por su parte, en el gráfico de dispersión de los residuos se observa un importante alejamiento de la diagonal en la parte central, lo cual indica ciertos problemas de normalidad de los residuos del modelo. Estos problemas son debidos a la supresión de la constante del modelo, a la combinación de las variables medidas y a las carencias de normalidad de dichas variables.

ANOVA^{c,d}

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2629374,6	3	876458,216	3345,134	,000 ^a
	Residual	235022,893	897	262,010		
	Total	2864397,5 ^b	900			

a. Variables predictoras: H, C, D

b. Esta suma de cuadrados total no se ha corregido para la constante porque la constante es cero para la regresión a través del origen.

c. Variable dependiente: Infiltración

d. Regresión lineal a través del origen

Coeficientes^{a,b}

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.	Intervalo de confianza para B al 95%		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta				Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	D	224,213	3,060	1,318	73,267	,000	218,207	230,219	,926	,926	,701	,283	3,539	
	C	-23,405	1,983	-,147	-11,805	,000	-27,296	-19,514	,507	-,367	-,113	,588	1,700	
	H	-,101	,004	-,370	-22,978	,000	-,110	-,093	,615	-,609	-,220	,352	2,838	

a. Variable dependiente: Infiltración

b. Regresión lineal a través del origen

Con todo, el modelo planteado tiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,887$ (el modelo explica un 88,7% de la variabilidad de los resultados mediante regresión a través del origen). Las variables explicativas son significativas simultáneamente al 95% ya que el test de la F de Fisher Snedecor proporciona un p-valor menor que 0,05. Todas las variables son

significativas individualmente al 95% ya que los p-valores del contraste del estadístico T son menores de 0,05. Además, se ha realizado un diagnóstico por caso y no se han encontrado valores atípicos situados a más de 3 desviaciones típicas.



Se selecciona el cuarto modelo planteado por ser un ajuste semejante al seleccionado para adoquines con un coeficiente determinación alto y unas hipótesis de regresión aceptables.


ANEXO 3: CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN CAMPO



RESULTADOS CON EL LCS

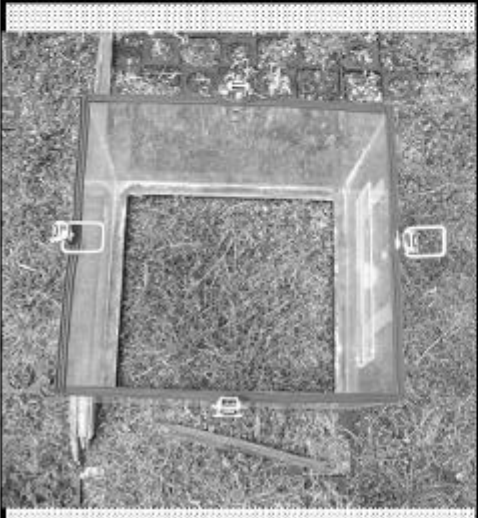
Tipo de pavimento	Tiempo de evacuación	
	Punto 1	Punto 2
Césped con refuerzos de hormigón (relleno arcilloso) RG1	Punto 1	1421,94
	Punto 2	1440,02
	Punto 3	809,61
Césped con refuerzos de plástico (relleno arenoso) RG2	Punto 1	114,28
	Punto 2	268,43
	Punto 3	70,11
Mezcla bituminosa impermeable nueva (pocos meses de antigüedad) A1	Punto 1	2000
	Punto 2	2000
	Punto 3	2000
Mezcla bituminosa impermeable (varios años de antigüedad) A2	Punto 1	2500
	Punto 2	360,99
	Punto 3	839,03
Mezcla bituminosa porosa solicitada (carretera con tráfico pesado) PA1	Punto 1	2000
	Punto 2	1077,61
	Punto 3	78,41
Mezcla bituminosa porosa poco solicitada (aparcamiento de ligeros) PA2	Punto 1	27,34
	Punto 2	13,02
	Punto 3	23,28
Pavimento impermeable de adoquines (sellado con mortero) B1	Punto 1	27,4
	Punto 2	19
	Punto 3	18,9
Pavimento permeable de adoquines (sin recebo) B2	Punto 1	3,68
	Punto 2	3,71
	Punto 3	6,25
Superficie impermeable (placa metálica) MP	Punto 1	2000
	Punto 2	2000
	Punto 3	2000




RESULTADOS CON EL ICP


UC <small>UNIVERSIDAD DE CANTABRIA</small>	Ficha de ensayo in situ con ICP	
Descripción del lugar de ensayo		
Ciudad	Santander	
Ubicación	Frente a la entrada izquierda sin uso de la ETSICCP	
Descripción del pavimento	Césped reforzado con celda de hormigón	Pendiente 0%
Foto	Croquis de ubicación	
		
Información del ensayo		
Nº de ensayo :	1	Fecha : 08/05/2007
		Hora : 12:45
T años	I mm/hr	Modelo ICP Nº
10	109,5	16
50	152,61	16
250	224,84	36
H en C.C. cm	H en cámara de inundación [cm]	
5,9	Pto 1	Pto 2
8,1	1,3	1,2
3,7	2,1	1,8
	Pto 3	2,2
	3,2	3,1
	10 (1,3)	10 (1,2)
	10 (1,8)	
Observaciones		
La estanqueidad se consiguió con arcilla.		
El área de descarga la constituían 4 cuadrados de césped.		
El ensayo se finalizó el día 9.		
Las temperaturas fueron agua a 20 y 22 °C, terreno a 28 °C.		

UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA		Ficha de ensayo in situ con ICP			GITECO UC		
Descripción del lugar de ensayo							
Ciudad	Santander						
Ubicación	Dirección Liencres en las casas justo antes de la rotonda del hospital (nº 7C)						
Descripción del pavimento	Capa superficial de 5 cm de PA 12 para drenaje.	Pendiente	2%				
Foto			Croquis de ubicación				
							
Información del ensayo							
Nº de ensayo :	2		Fecha :	10/05/2007			
			Hora :	10:30			
T años	I mm/hr	Modelo ICP Nº	H en C.C. cm	H en cámara de inundación [cm]			
				Pto 1	Pto 2	Pto 3	
10	109,5	16	5,9	1,1	0		
50	152,61	16	8,1	1,9	0,1	0	
250	224,84	36	3,7	2,7	1	0,5	
				Resultado :	10 (1,1)	50 (0,1)	250 (0,5)
Resultado del ensayo :				10 (1,1)			
Observaciones							
El tercer punto no está apuntado y es posible que los goteros comenzasen a fallar.							

UC <small>UNIVERSIDAD DE CANTABRIA</small>	Ficha de ensayo in situ con ICP						
Descripción del lugar de ensayo							
Ciudad	Santander						
Ubicación	Aparcamiento del estadio de fútbol del Sardinero						
Descripción del pavimento	Adoquines impermeables.	Pendiente 2%					
Foto	Croquis de ubicación						
	<p>3 Bis Plaza 1 4 Tribuna Preferencia Este Este</p> <p style="text-align: center;">Plazas</p> <p style="text-align: right;">15 16 17</p>						
Información del ensayo							
Nº de ensayo :	3	Fecha : 14/05/2007 Hora : 10:00					
T años	I mm/hr	Modelo ICP Nº	H en C.C. cm	H en cámara de inundación [cm]			
				Pto 1	Pto 2	Pto 3	
10	109,5	16	5,9	1,2	0,6	1,7	
50	152,61	16	8,1	2,1	1,7	1,4	
250	224,84	36	3,7	2,5	1,1	1,3	
				Resultado :	10 (1,2)	10 (0,6)	10 (1,7)
Resultado del ensayo :				10 (1,7)			
Observaciones							
Los resultados de T=250 años no son fiables, los goteros estarían ya taponados.							

UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA		Ficha de ensayo in situ con ICP			GITECO UC		
Descripción del lugar de ensayo							
Ciudad	Gijón						
Ubicación	Aparcamiento de la Guía, plazas experimentales 1, 2 y 3.						
Descripción del pavimento	Césped reforzado con celda de plástico Atlantis	Pendiente	2%				
Foto			Croquis de ubicación				
							
Información del ensayo							
Nº de ensayo :	6		Fecha :	16/05/2007			
			Hora :	16:00			
T años	I mm/hr	Modelo ICP Nº	H en C.C. cm	H en cámara de inundación [cm]			
				Pto 1	Pto 2	Pto 3	
10	92,03	16	5,0		1,8		
50	126,98	16	6,8	0	1,9		
250	182,9	16	9,7	0,5	2,6	0	
				Resultado :	50 (0,0)	10 (1,8)	250 (0,0)
Resultado del ensayo :		10 (1,8)					
Observaciones							

	Ficha de ensayo in situ con ICP	
Descripción del lugar de ensayo		
Ciudad	Gijón	
Ubicación	Aparcamiento de la Guía, plazas experimentales 4, 5 y 6.	
Descripción del pavimento	Adoquines sin recebo.	Pendiente 2%
Foto	Croquis de ubicación	
		
Información del ensayo		
Nº de ensayo :	7	Fecha : 16/05/2007 Hora : 14:00
T años	I mm/hr	Modelo ICP Nº
10	92,03	16
50	126,98	16
250	182,9	16
		H en C.C. cm
		5,0
		6,8
		9,7
H en cámara de inundación [cm]		
Pto 1 Pto 2 Pto 3		
0 0 0		
Resultado : 250 (0,0) 250 (0,0) 250 (0,0)		
Resultado del ensayo : 250 (0,0)		
Observaciones		

UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA		Ficha de ensayo in situ con ICP			GITECO UC	
Descripción del lugar de ensayo						
Ciudad	Gijón					
Ubicación	Aparcamiento de la Guía, plazas experimentales 13, 14 y 15.					
Descripción del pavimento	Mezcla bituminosa porosa (PA 12)				Pendiente	2%
Foto			Croquis de ubicación			
						
Información del ensayo						
Nº de ensayo :	5		Fecha :	16/05/2007		
			Hora :	12:00		
T años	I mm/hr	Modelo ICP Nº	H en C.C. cm	H en cámara de inundación [cm]		
				Pto 1	Pto 2	Pto 3
10	92,03	16	5,0			
50	126,98	16	6,8			
250	182,9	16	9,7	0	0	0
				Resultado :	250 (0,0)	250 (0,0)
Resultado del ensayo :				250 (0,0)		
Observaciones						

Debido al mal funcionamiento de los goteros hubo que repetir las mediciones del aparcamiento del Racing y se realizó una ventana a la cámara de inundación para el chequeo y seguimiento de los goteros.

Superficie	Periodo de retorno		
	10	50	250
Césped con refuerzos de hormigón (relleno arcilloso) RG1	1,3	2,1	3,2
	1,2	1,8	3,1
	1,8	2,1	2,9
Césped con refuerzos de plástico (relleno arenoso) RG2	0	0	0,5
	1,8	1,9	2,6
	0	0	0
Mezcla bituminosa impermeable nueva (pocos meses de antigüedad) A1	2,1	2,6	4
	2,1	2,6	3,5
	2,3	2,5	3,4
Mezcla bituminosa impermeable (varios años de antigüedad) A2	2	2,8	3,5
	1,7	2	3,1
	1,9	2,5	3,4
Mezcla bituminosa porosa solicitada (carretera con tráfico pesado) PA1	1,1	1,9	2,7
	0	0,1	1
	0	0	0,5
Mezcla bituminosa porosa poco solicitada (aparcamiento de ligeros) PA2	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
Pavimento impermeable de adoquines (sellado con mortero) B1	1,2	2,1	3,4
	0,6	1,7	2,7
	2	2,4	4,3
Pavimento permeable de adoquines (sin recebo) B2	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
Superficie impermeable (placa metálica) MP	2,4	2,8	3,6
	2,1	2,7	3,5
	2,3	2,6	3,8

**ANEXO 4: RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS POROSAS A LOS
VERTIDOS DE HIDROCARBUROS**

RESULTADOS CON EL BETÚN CONVENCIONAL B 60/70

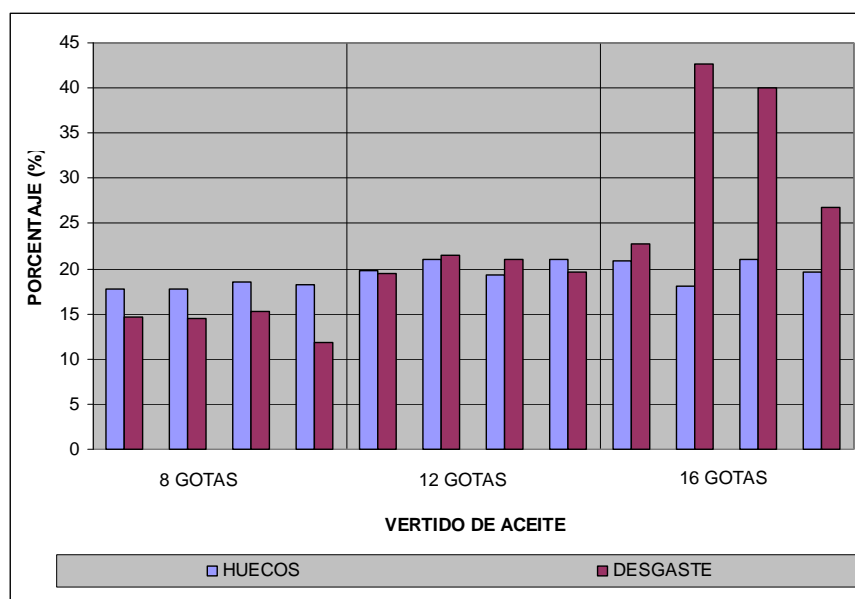
BETÚN B 60/70 (1/3)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	NIVEL	DESGASTE
0*	0	19,30	0,12	Tanteos		
0*	1	18,71	0,12	Tanteos		
0*	2	20,93	0,17	Tanteos		
0*	3	19,35	0,19	Tanteos		
0*	4	22,42	0,18	Tanteos		
0*	5	21,97	0,12	Tanteos		
1*	1	18,06	0,16		CONTROL	14,12
1*	2	17,59	0,10		CONTROL	11,91
1*	3	17,50	0,08		CONTROL	14,75
1*	4	19,43	0,19		CONTROL	12,86
1*	5	17,69	0,09	Escurrimiento	Sólo aceite (8)	14,63
1*	6	17,82	0,13	Escurrimiento	Sólo aceite (8)	14,42
1*	7	18,56	0,16	Escurrimiento	Sólo aceite (8)	15,28
1*	8	18,30	0,12	Escurrimiento	Sólo aceite (8)	11,77
1*	9	18,91	0,11	Escurrimiento	0	10,94
1*	10	18,88	0,07	Escurrimiento	0	10,89
1*	11	17,81	0,07	Escurrimiento	0	10,46
1*	12	18,15	0,12	Escurrimiento	0	14,65
1*	13	18,84	0,10	Escurrimiento	1	10,73
1*	14	19,65	0,16	Escurrimiento	1	11,27
1*	15	17,42	0,16	Escurrimiento	1	10,50
1*	16	19,53	0,10	Escurrimiento	1	12,61
1*	17	19,59	0,14	Escurrimiento	2	18,93
1*	18	19,59	0,14	Escurrimiento	2	19,52
1*	19	17,46	0,10	Escurrimiento	2	12,77
1*	20	20,25	0,16	Escurrimiento	2	16,56
1*	21	19,07	0,15	Escurrimiento	2	17,28
1*	22	19,14	0,14	Escurrimiento	2	11,35
1*	23	19,13	0,09	Escurrimiento	2	12,89
1*	24	19,31	0,14	Escurrimiento	2	12,86
1*	25	18,27	0,13	Escurrimiento	2	9,91
1*	26	19,24	0,17	Escurrimiento	2	16,95
1*	27	19,88	0,19	Escurrimiento	2	23,35
1*	28	18,83	0,15	Escurrimiento	2	31,67
2	0	21,42	0,36	Semi-inmersión	0	32,71
2	1	22,21	0,39		CONTROL	30,00
2	2	18,88	0,25		CONTROL	18,98
2	3	20,57	0,36		CONTROL	22,33
2	4	20,59	0,29		CONTROL	32,46

BETÓN B 60/70 (2/3)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	NIVEL	DESGASTE
2	5	19,73	0,23	Escurrecimiento	Sólo aceite (12)	19,43
2	6	21,07	0,39	Escurrecimiento	Sólo aceite (12)	21,54
2	7	19,30	0,28	Escurrecimiento	Sólo aceite (12)	20,96
2	8	21,01	0,29	Escurrecimiento	Sólo aceite (12)	19,67
2	9	21,68	0,36	Escurrecimiento	0	22,96
2	10	21,56	0,39	Escurrecimiento	0	20,04
2	11	20,03	0,27	Escurrecimiento	0	18,63
2	12	18,94	0,23	Escurrecimiento	0	28,29
2	13	22,00	0,42	Escurrecimiento	1	39,31
2	14	21,31	0,33	Escurrecimiento	1	23,08
2	15	19,00	0,23	Escurrecimiento	1	31,97
2	16	19,12	0,23	Escurrecimiento	1	22,09
2	17	20,99	0,38	Escurrecimiento	2	29,56
2	18	20,36	0,30	Escurrecimiento	2	29,32
2	19	21,56	0,35	Escurrecimiento	2	29,64
2	20	21,70	0,34	Escurrecimiento	2	40,96
2	21	20,81	0,34	Escurrecimiento	3	32,09
2	22	19,14	0,30	Escurrecimiento	3	21,16
2	23	21,52	0,39	Escurrecimiento	3	26,96
2	24	20,92	0,31	Escurrecimiento	3	27,25
2	25	19,90	0,21	Escurrecimiento	3	23,74
2	26	20,36	0,27	Escurrecimiento	3	18,51
2	27	23,46	0,44	Escurrecimiento	3	40,17
2	28	18,98	0,16	Escurrecimiento	3	21,50
2	29	19,82	0,32		CONTROL	26,35
2	30	20,33	0,39		CONTROL	26,90
2	31	19,95	0,25		CONTROL	15,95
2	32	19,85	0,35		CONTROL	26,75
2	33	20,85	0,36	Escurrecimiento	Sólo aceite (16)	22,79
2	34	18,13	0,24	Escurrecimiento	Sólo aceite (16)	42,72
2	35	21,05	0,33	Escurrecimiento	Sólo aceite (16)	39,94
2	36	19,59	0,22	Escurrecimiento	Sólo aceite (16)	26,83
2	37	18,29	0,17	Escurrecimiento	1	30,38
2	38	20,90	0,28	Escurrecimiento	1	27,49
2	39	20,49	0,33	Escurrecimiento	1	16,65
2	40	19,98	0,23	Escurrecimiento	1	19,56
2	41	19,60	0,22	Escurrecimiento	2	27,47
2	42	18,50	0,20	Escurrecimiento	2	20,72
2	43	20,74	0,35	Escurrecimiento	2	40,06
2	44	18,01	0,16	Escurrecimiento	2	27,95
2	45	20,27	0,30	Escurrecimiento	2	26,32
2	46	20,22	0,29	Escurrecimiento	2	21,54
2	47	19,85	0,36	Escurrecimiento	2	19,82
2	48	20,49	0,33	Escurrecimiento	2	20,49
2	49	20,14	0,35	Escurrecimiento	3	31,18
2	50	19,97	0,24	Escurrecimiento	3	17,96
2	51	20,52	0,25	Escurrecimiento	3	28,27

BETÓN B 60/70 (3/3)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	TRATAMIENTO	DESGASTE
2	52	20,08	0,30	Escurrimiento	3	23,20
2	53	19,92	0,33	Escurrimiento	3	21,96
2	54	20,76	0,32	Escurrimiento	3	20,09
2	55	19,36	0,32	Escurrimiento	3	25,92
2	56	18,47	0,20	Escurrimiento	3	23,48
2	57	19,41	0,24	Semi-inmersión	0	24,29
2	58	19,86	0,32	Semi-inmersión	Aceite (3)	22,35
2	59	19,81	0,26	Semi-inmersión	Aceite (3)	41,66
2	60	18,21	0,16	Semi-inmersión	Aceite (3)	32,77
2	61	19,08	0,22	Semi-inmersión	Gasolina (3)	21,38
2	62	19,88	0,24	Semi-inmersión	Gasolina (3)	26,87
2	63	18,49	0,20	Semi-inmersión	Gasolina (3)	40,60
2	64	19,92	0,33	Semi-inmersión	Gasoil (3)	25,55
2	65	18,41	0,17	Semi-inmersión	Gasoil (3)	36,34
2	66	19,24	0,28	Semi-inmersión	Gasoil (3)	39,76

* Con el betún B 60/70, las tandas 0 y 1 se fabricaron con la granulometría 1, mientras que la tanda 2 se fabricó con la granulometría 2.

Además, se tomaron 12 probetas fabricadas con betún B 60/70 para comprobar la afección del vertido de aceite sin simulación de lluvia, y por tanto sin lavado alguno con agua. Los porcentajes de huecos de las probetas y los resultados de desgaste que se obtuvieron tras la afección del aceite se muestran en la siguiente figura. Se puede comprobar la gran variabilidad en los resultados, y que el aceite por sí sólo afecta incluso más que combinado con la acción del agua, la cual en el caso del B 60/70 realiza una labor importante de lavado.



RESULTADOS CON EL BETÚN MODIFICADO BM-3B

BETÚN BM-3b (1/3)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	TRATAMIENTO	DESGASTE
0	1	16,99	0,13	Cántabro	Con agua	9,8
0	2	17,88	0,18	Cántabro	Con agua	5,3
0	3	16,81	0,21	Cántabro	Con agua	8,6
0	4	16,73	0,15	Cántabro	Con agua	12,1
0	5	17,19		Cántabro	Sin agua	3,9
0	6	18,93		Cántabro	Sin agua	4,7
0	7	17,70		Cántabro	Sin agua	3,0
0	8	18,57		Cántabro	Sin agua	5,6
1	0	22,42	0,34	-	-	-
1	1	20,68	0,29		CONTROL	10,88
1	2	19,55	0,19		CONTROL	41,22
1	3	21,84	0,30		CONTROL	9,61
1	4	21,57	0,37		CONTROL	7,34
1	5	21,38	0,32	Escurrimiento	0	12,90
1	6	21,08	0,35	Escurrimiento	0	8,78
1	7	20,20	0,26	Escurrimiento	0	7,78
1	8	21,89	0,37	Escurrimiento	0	11,41
1	9	20,18	0,28	Escurrimiento	2	7,88
1	10	21,28	0,29	Escurrimiento	2	11,19
1	11	21,82	0,39	Escurrimiento	2	12,43
1	12	19,92	0,31	Escurrimiento	2	12,39
1	13	21,36	0,29	Escurrimiento	3	16,66
1	14	20,58	0,29	Escurrimiento	3	10,96
1	15	20,69	0,29	Escurrimiento	3	9,58
1	16	19,96	0,25	Escurrimiento	3	8,83
1	17	22,53	0,39	Escurrimiento	4	12,16
1	18	21,70	0,35	Escurrimiento	4	8,16
1	19	20,09	0,25	Escurrimiento	4	10,97
1	20	21,43	0,30	Escurrimiento	4	17,95
1	21	22,29	0,35		CONTROL	9,61
1	22	20,07	0,29		CONTROL	9,25
1	23	20,84	0,33		CONTROL	8,73
1	24	20,62	0,23		CONTROL	14,09
1	25	20,92	0,29	Escurrimiento	0	15,64
1	26	20,36	0,24	Escurrimiento	0	14,05
1	27	21,63	0,42	Escurrimiento	0	10,83
1	28	21,18	0,37	Escurrimiento	0	12,68
1	29	21,48	0,38	Escurrimiento	2	12,99
1	30	21,42	0,30	Escurrimiento	2	11,51
1	31	19,81	0,28	Escurrimiento	2	14,82
1	32	20,32	0,30	Escurrimiento	2	11,18
1	33	20,40	0,33	Escurrimiento	3	14,09
1	34	21,01	0,33	Escurrimiento	3	13,80

BETÚN BM-3b (2/3)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	TRATAMIENTO	DESGASTE
1	35	20,70	0,22	Escurrimiento	3	10,86
1	36	21,60	0,37	Escurrimiento	3	11,55
1	37	20,61	0,28	Escurrimiento	4	11,42
1	38	19,88	0,30	Escurrimiento	4	9,52
1	39	20,06	0,27	Escurrimiento	4	14,02
1	40	22,24	0,35	Escurrimiento	4	18,08
1	41	21,47	0,33		CONTROL	9,83
1	42	21,61	0,26		CONTROL	8,44
1	43	18,43	0,24		CONTROL	6,33
1	44	19,50	0,22		CONTROL	11,39
1	45	20,62	0,28	Escurrimiento	0	10,14
1	46	18,41	0,21	Escurrimiento	0	7,75
1	47	20,52	0,28	Escurrimiento	0	10,13
1	48	19,75	0,29	Escurrimiento	0	10,33
1	49	20,31	0,34	Escurrimiento	2	10,65
1	50	20,39	0,32	Escurrimiento	2	11,39
1	51	21,10	0,35	Escurrimiento	2	13,35
1	52	18,49	0,23	Escurrimiento	2	11,56
1	53	20,04	0,35	Escurrimiento	3	8,93
1	54	19,00	0,19	Escurrimiento	3	6,05
1	55	20,14	0,26	Escurrimiento	3	11,61
1	56	22,12	0,38	Escurrimiento	3	11,23
1	57	19,86	0,29	Escurrimiento	4	7,89
1	58	20,43	0,31	Escurrimiento	4	10,11
1	59	20,01	0,23	Escurrimiento	4	9,13
1	60	20,43	0,26	Escurrimiento	4	12,07
1	61	20,32	0,30	Semi-inmersión	Gasoil (4)	31,78
1	62	19,11	0,26	Semi-inmersión	Gasoil (4)	27,96
1	63	19,37	0,21	Semi-inmersión	Gasoil (4)	22,65
1	64	19,59	0,38	-	-	-
2	0	20,62	0,30	-	-	-
2	1	20,67	0,28	Semi-inmersión	0	30,37
2	2	18,93	0,22	Semi-inmersión	0	22,77
2	3	18,71	0,17	Semi-inmersión	Aceite (3)	17,42
2	4	20,72	0,36	Semi-inmersión	Aceite (3)	20,16
2	5	20,96	0,30	Semi-inmersión	Aceite (3)	21,71
2	6	21,12	0,31	Semi-inmersión	Gasolina (3)	20,45
2	7	19,55	0,24	Semi-inmersión	Gasolina (3)	21,25
2	8	19,24	0,21	Semi-inmersión	Gasolina (3)	25,70
2	9	20,43	0,23	Semi-inmersión	Gasoil (3)	30,79
2	10	20,27	0,33	Semi-inmersión	Gasoil (3)	24,03
2	11	20,76	0,37	Semi-inmersión	Gasoil (3)	27,32
2	12	20,15	0,24	Semi-inmersión	0	15,34
2	13	21,39	0,35	Semi-inmersión	0	24,63
2	14	20,52	0,33	Semi-inmersión	0	24,95
2	15	20,35	0,30	Semi-inmersión	Aceite (4)	23,22

BETÓN BM-3b (3/3)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	TRATAMIENTO	DESGASTE
2	16	18,66	0,19	Semi-inmersión	Aceite (4)	20,59
2	17	19,22	0,22	Semi-inmersión	Aceite (4)	22,78
2	18	21,00	0,35	Semi-inmersión	Gasolina (4)	24,28
2	19	18,86	0,25	Semi-inmersión	Gasolina (4)	22,58
2	20	19,91	0,28	Semi-inmersión	Gasolina (4)	18,24
2	21	20,20	0,32	-	-	-
2	22	20,99	0,26	-	-	-

Con el betón BM-3b, la tanda 0 se fabricó con la granulometría 1, mientras que las tandas 1 y 2 se fabricaron con la granulometría 2.

RESULTADOS CON EL BETÚN ANTICARBURANTE BAC

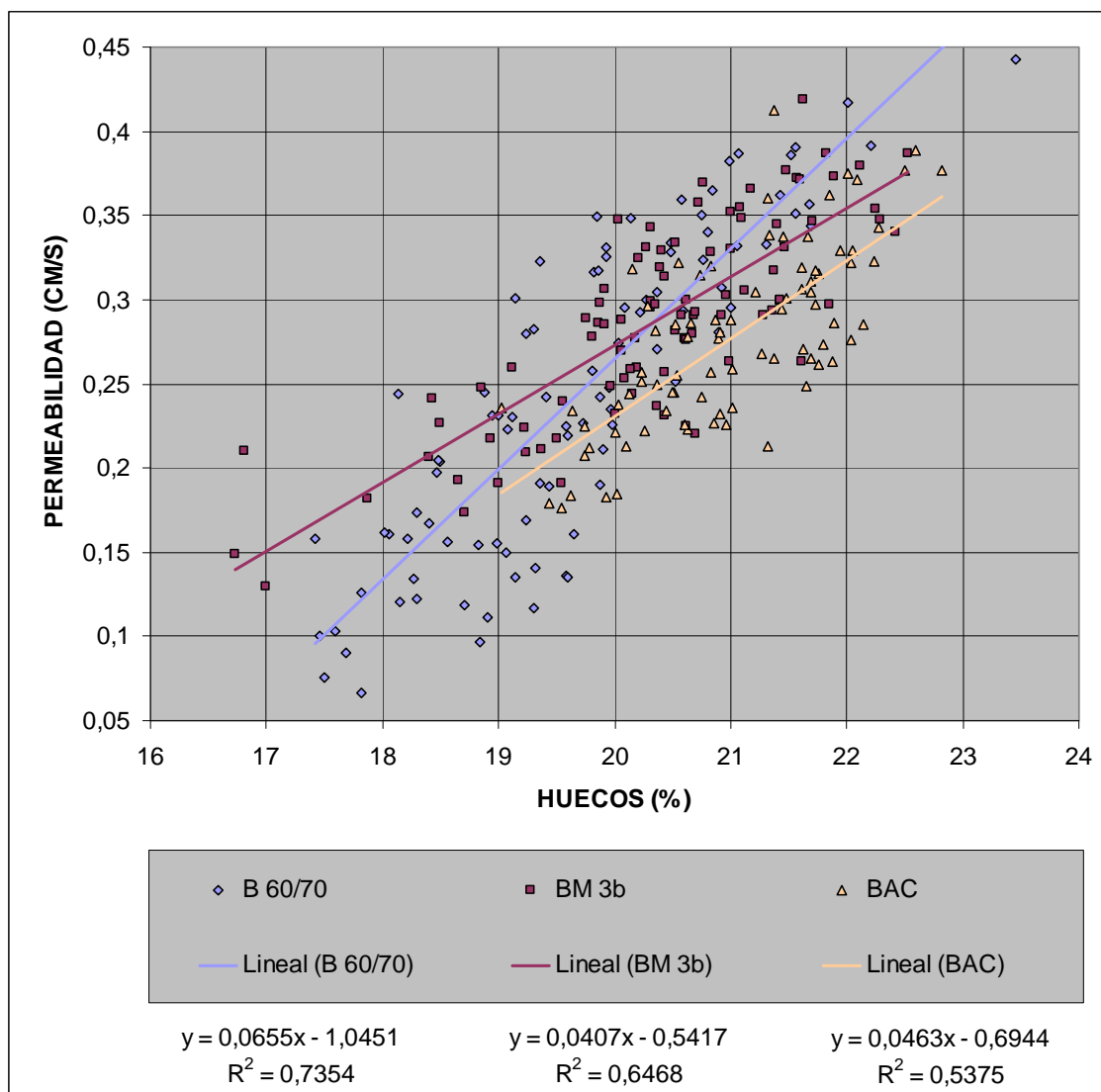
BETÚN BAC (1/2)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	TRATAMIENTO	DESGASTE
1	0	19,62	0,184	Semi-inmersión	0	38,0
1	1	21,01	0,259		CONTROL	28,0
1	2	22,28	0,343		CONTROL	26,7
1	3	20,54	0,255		CONTROL	19,3
1	4	20,63	0,223		CONTROL	17,1
1	5	21,76	0,315	Escurrecimiento	0	24,4
1	6	20,13	0,244	Escurrecimiento	0	16,3
1	7	19,78	0,212	Escurrecimiento	0	16,2
1	8	21,32	0,360	Escurrecimiento	0	20,2
1	9	22,50	0,377	Escurrecimiento	3	30,9
1	10	20,63	0,278	Escurrecimiento	3	23,7
1	11	22,09	0,371	Escurrecimiento	3	25,4
1	12	21,45	0,338	Escurrecimiento	3	26,3
1	13	21,27	0,268	Escurrecimiento	4	22,4
1	14	20,96	0,225	Escurrecimiento	4	21,3
1	15	21,21	0,305	Escurrecimiento	4	39,6
1	16	21,73	0,318	Escurrecimiento	4	23,9
1	17	21,37	0,412	Escurrecimiento	5	28,2
1	18	20,51	0,245	Escurrecimiento	5	22,1
1	19	19,03	0,236	Escurrecimiento	5	37,4
1	20	20,28	0,297	Escurrecimiento	5	25,0
1	21	19,74	0,224		CONTROL	13,3
1	22	20,10	0,213		CONTROL	22,5
1	23	20,15	0,318		CONTROL	16,1
1	24	19,63	0,234		CONTROL	16,7
1	25	21,65	0,248	Escurrecimiento	0	20,2
1	26	22,04	0,276	Escurrecimiento	0	25,4
1	27	20,73	0,314	Escurrecimiento	0	23,9
1	28	20,49	0,245	Escurrecimiento	0	20,6
1	29	21,06	0,191	Escurrecimiento	3	26,5
1	30	20,83	0,320	Escurrecimiento	3	26,3
1	31	21,94	0,329	Escurrecimiento	3	28,3
1	32	21,69	0,305	Escurrecimiento	3	28,4
1	33	21,44	0,294	Escurrecimiento	4	16,3
1	34	21,61	0,319	Escurrecimiento	4	22,5
1	35	20,75	0,242	Escurrecimiento	4	21,5
1	36	21,73	0,297	Escurrecimiento	4	17,7
1	37	21,76	0,262	Escurrecimiento	5	24,2
1	38	20,86	0,227	Escurrecimiento	5	22,7
1	39	21,62	0,307	Escurrecimiento	5	24,4
1	40	19,54	0,176	Escurrecimiento	5	37,3
1	41	20,36	0,250		CONTROL	16,8
1	42	21,02	0,236		CONTROL	18,3

BETÚN BAC (2/2)						
TANDA	PROBETA	HUECOS	PERMEABILIDAD	ENSAYO	TRATAMIENTO	DESGASTE
1	43	20,03	0,237		CONTROL	19,9
1	44	20,65	0,286		CONTROL	25,6
1	45	20,35	0,281	Escurrencimiento	0	27,4
1	46	19,75	0,208	Escurrencimiento	0	21,7
1	47	20,23	0,256	Escurrencimiento	0	17,6
1	48	22,82	0,377	Escurrencimiento	0	28,2
1	49	20,89	0,277	Escurrencimiento	3	29,5
1	50	22,23	0,323	Escurrencimiento	3	19,4
1	51	22,14	0,285	Escurrencimiento	3	25,9
1	52	20,86	0,288	Escurrencimiento	3	32,9
1	53	19,93	0,183	Escurrencimiento	4	19,5
1	54	22,59	0,388	Escurrencimiento	4	27,1
1	55	20,55	0,322	Escurrencimiento	4	35,7
1	56	21,32	0,213	Escurrencimiento	4	26,3
1	57	21,01	0,288	Escurrencimiento	5	16,5
1	58	20,82	0,257	Escurrencimiento	5	27,1
1	59	21,80	0,273	Escurrencimiento	5	29,6
1	60	22,05	0,329	Escurrencimiento	5	18,9
1	61	22,04	0,321	Semi-inmersión	0	38,0
1	62	21,87	0,263	Semi-inmersión	Aceite (3)	38,4
1	63	22,00	0,375	Semi-inmersión	Aceite (3)	40,2
1	64	20,01	0,221	Semi-inmersión	Aceite (3)	42,5
1	65	21,49	0,301	Semi-inmersión	Gasolina (3)	31,3
1	66	21,69	0,265	Semi-inmersión	Gasolina (3)	36,3
1	67	21,66	0,337	Semi-inmersión	Gasolina (3)	40,3
1	68	21,37	0,265	Semi-inmersión	Gasoil (3)	43,2
1	69	20,23	0,252	Semi-inmersión	Gasoil (3)	48,0
1	70	20,52	0,285	Semi-inmersión	Gasoil (3)	49,0
1	71	19,43	0,179	Semi-inmersión	0	53,6
1	72	20,45	0,234	Semi-inmersión	0	22,7
1	73	21,63	0,271	Semi-inmersión	0	37,6
1	74	21,33	0,339	Semi-inmersión	Aceite (5)	33,7
1	75	21,85	0,362	Semi-inmersión	Aceite (5)	37,6
1	76	20,61	0,226	Semi-inmersión	Aceite (5)	35,4
1	77	20,91	0,281	Semi-inmersión	Gasolina (5)	42,7
1	78	21,89	0,286	Semi-inmersión	Gasolina (5)	33,2
1	79	20,02	0,185	Semi-inmersión	Gasolina (5)	27,5
1	80	20,91	0,232	Semi-inmersión	Gasoil (5)	31,8
1	81	20,26	0,223	Semi-inmersión	Gasoil (5)	59,0
1	82	21,70	0,311	Semi-inmersión	Gasoil (5)	49,2

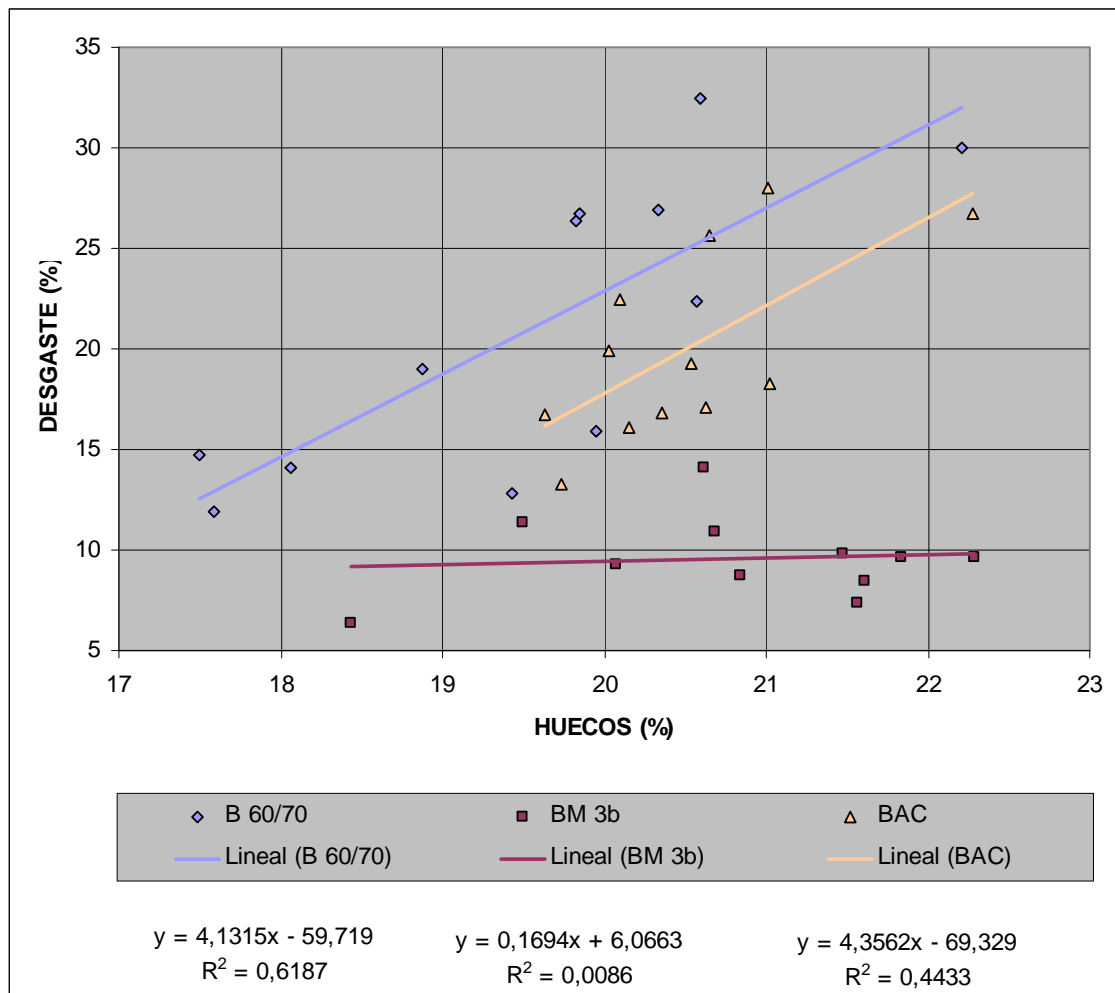
Con el betún BAC, todas las probetas se fabricaron con la granulometría 2.

ANÁLISIS DE REGRESIÓN

La siguiente figura muestra los ajustes lineales de la permeabilidad en función de los huecos para las 276 probetas fabricadas con los 3 tipos de betún. Se observa como los betunes modificados muestran comportamientos paralelos, ofreciendo un incremento de la permeabilidad con incremento del porcentaje de huecos menor que el betún convencional. Además, los betunes modificados presentan peores coeficientes de ajuste que el betún convencional, siendo el BAC el betún que presenta el más bajo de los tres (R^2 de 0,54), ofreciendo los valores más bajos de permeabilidad para un porcentaje de huecos dado. El ajuste correspondiente al betún convencional B 60/70, el material más homogéneo de los tres empleados, que ofrece un coeficiente R^2 de 0,73.



Relacionando linealmente los 36 valores referidos a huecos y desgaste, según el tipo de betún, se puede observar de nuevo como el B 60/70 vuelve a mostrar la tendencia más clara, con el mejor ajuste lineal ($R^2 = 0,62$). Por su parte, el betún modificado BM-3b muestra una resistencia al desgaste que apenas se ve afectada por el aumento del porcentaje de huecos. Por último, el BAC ofrece un aumento de desgaste con los huecos paralelo al correspondiente al betún convencional, pero con menores valores de desgaste para el mismo porcentaje de huecos. Así, al relacionar linealmente el porcentaje de huecos con el desgaste, se encuentra un único valor atípico situado a más de 2 desviaciones típicas correspondiente al BM-3b. El ajuste resultante es pésimo, R^2 de 0,02. Con todo, la mayor resistencia que ofrecen los betunes modificados para el mismo porcentaje de huecos puede explicarse por la acción de refuerzo de los polímeros, siendo esta claramente superior en el betún BM-3b.



ANEXO 5: FUNCIONALIDAD DE FIRMES PERMEABLES

FOTOGRAFÍAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

Adoquines con ranuras.



Mezcla bituminosa porosa.



Zahorra drenante de árido calizo procedente de cantera.



Zahorra drenante de árido reciclado procedente de la planta de BTB.



Celda y geotextil de fondo en los cubos del Laboratorio FIDICA.



Zahorra drenante en los cubos del Laboratorio FIDICA.



Geotextil de filtro y separación entre base y subbase en los cubos del Laboratorio FIDICA.



Base en los cubos del Laboratorio FIDICA.



Superficie de adoquines en los cubos del Laboratorio FIDICA.



Impermeabilización lateral en los cubos del Laboratorio FIDICA.



Uno de los 16 modelos del Laboratorio FIDICA completos.



Desagüe de fondo, o tubería de efluente, de los contenedores del Campus de Santander.



Celda y geotextil de fondo de los contenedores del Campus de Santander.



Zahorra drenante de los contenedores del Campus de Santander.



Puesta en obra de los áridos en los contenedores del Campus de Santander.



Geotextil de filtro y separación y base de los contenedores del Campus de Santander.



Superficie de adoquines de los contenedores del Campus de Santander.



Vista general de los 16 contenedores con los modelos del Campus de Santander.



Uno de los 16 modelos completos del Campus de Santander.



Separación de plazas, impermeabilización y celda de drenaje en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Arqueta de recogida del efluente en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Geotextil de fondo en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Zahorra drenante en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Mezcla bituminosa porosa en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Efluente en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Plazas de adoquines en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.



Plazas de mezcla bituminosa en el aparcamiento experimental de la Guía, en Gijón.

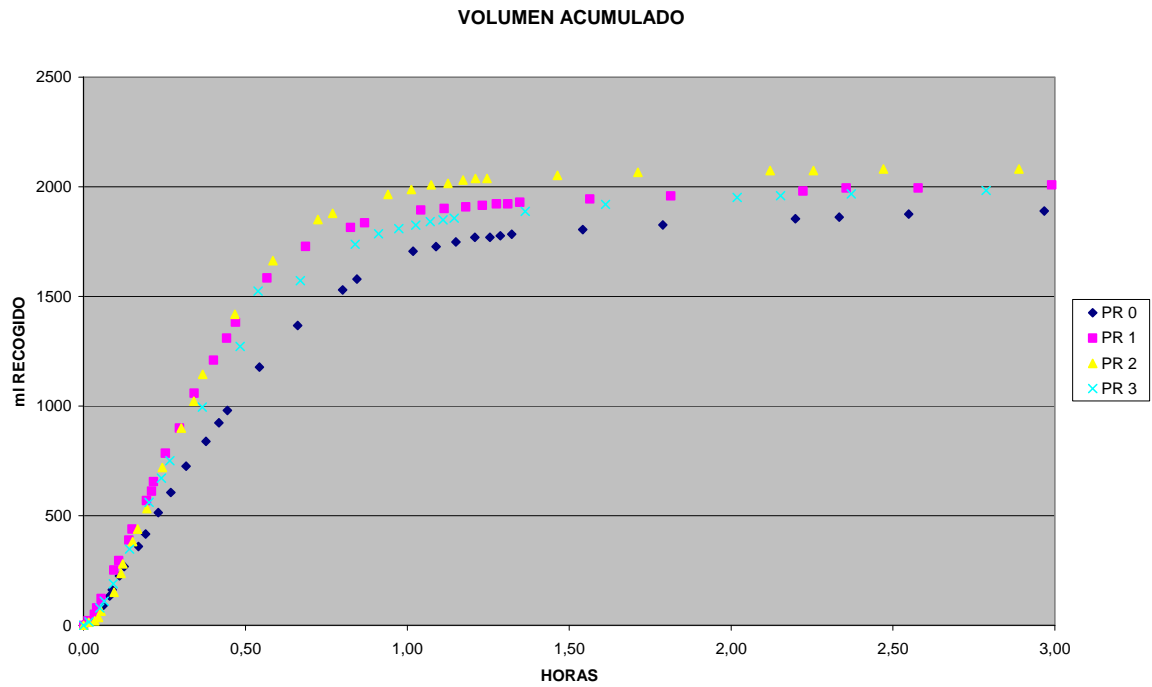


RESULTADOS CON LOS MODELOS DEL LABORATORIO

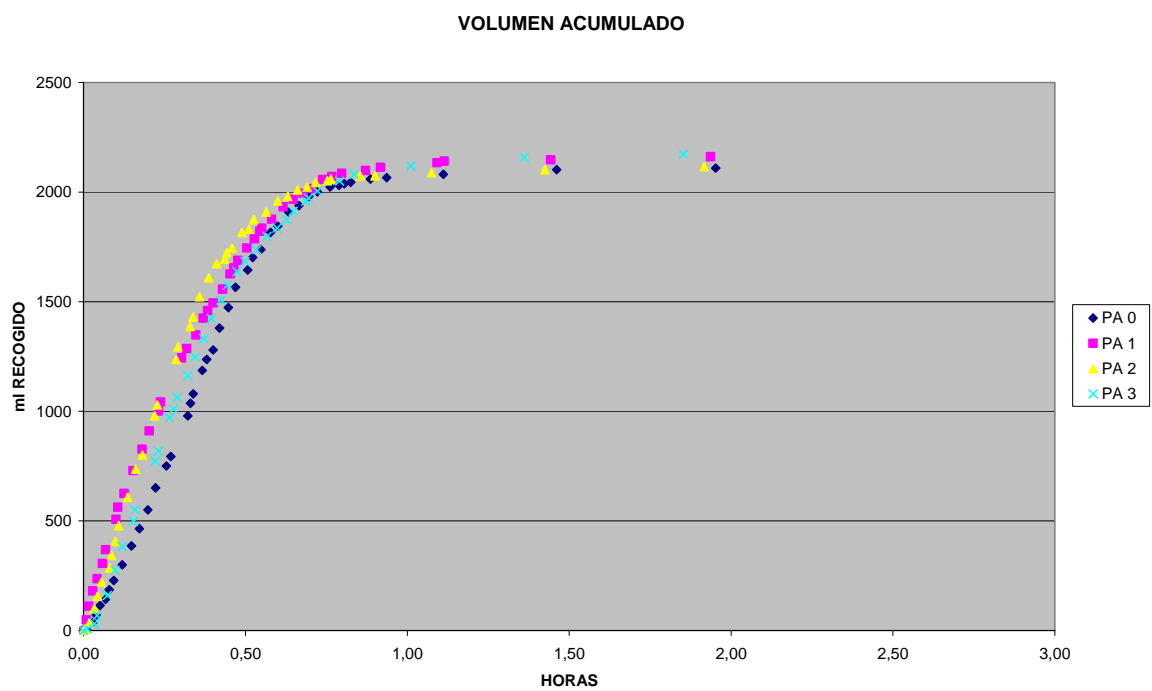
TIEMPO DE REACCIÓN (MINUTOS)										
Simulación	BR 0	BR 1	BR 2	BR 3	MEDIA BR	PR 0	PR 1	PR 2	PR 3	MEDIA PR
2	19,1	10,5	6,0	4,1	9,9	2,6	10,3	10,1	13,5	9,1
3	13,0	8,3	12,9	5,2	9,9	8,8	4,8	9,1	13,1	9,0
4	6,5	9,7	6,5	8,9	7,9	8,9	5,3	8,6	12,2	8,8
6	8,3	6,5	6,8	11,8	8,4	10,8	7,8	10,2	8,0	9,2
7	3,3	6,2	5,5	9,4	6,1	6,7	12,7	7,2	5,8	8,1
8	2,8	5,0	5,6	5,3	4,7	5,9	5,4	5,2	5,9	5,6
9	3,3	4,9	4,9	6,9	5,0	5,8	3,8	5,3	5,6	5,1
10	3,3	3,8	4,7	6,6	4,6	7,4	6,3	6,0	4,8	6,1
11	3,4	3,3	4,5	7,0	4,6	5,9	7,5	4,8	4,7	5,7
12	2,4	3,5	5,1	7,0	4,5	4,4	3,1	3,0	4,6	3,8
13	2,6	5,3	5,8	6,6	5,0	7,3	5,8	3,6	4,8	5,4
14	5,0	5,1	5,4	8,4	6,0	5,4	6,3	4,3	5,2	5,3
15	3,4	4,9	4,8	5,8	4,7	3,9	4,8	3,2	5,8	4,4
16	3,3	5,1	4,8	5,2	4,6	6,0	5,1	3,4	3,2	4,4
17	3,8	5,3	4,7	5,4	4,8	5,5	5,3	3,1	3,2	4,3
18	3,9	5,3	5,1	6,2	5,1	3,9	3,7	2,8	5,5	4,0
19	2,7	4,3	5,3	5,3	4,4	2,9	4,0	4,5	4,1	3,9
20	3,1	5,1	4,0	4,5	4,2	3,9	3,7	4,1	4,3	4,0
21	2,0	4,4	3,4	5,7	3,9	3,3	4,1	5,2	5,4	4,5
22	1,7	4,8	3,8	5,7	4,0	4,3	4,6	3,7	4,9	4,4
23	2,9	4,6	5,3	6,1	4,7	3,8	3,8	5,8	5,4	4,7
24	2,9	3,0	3,6	5,8	3,8	4,3	4,1	3,4	5,4	4,3
25	2,1	4,3	3,0	5,3	3,7	4,0	4,9	3,8	6,8	4,9
26	2,7	3,4	2,8	3,4	3,1	4,9	3,6	4,0	5,6	4,5
27	1,9	3,3	3,1	3,1	2,8	4,5	3,8	5,3	6,3	5,0
28	2,0	2,2	2,3	2,9	2,3	5,6	4,5	3,3	5,6	4,8
29	1,4	2,4	2,3	3,4	2,4	5,3	4,8	3,4	6,8	5,1
30	2,3	2,8	2,7	2,8	2,7	3,8	3,5	2,8	5,6	3,9
31	1,6	2,6	3,2	3,7	2,8	5,2	4,3	3,3	5,4	4,6
32	2,0	2,6	3,0	2,8	2,6	4,7	4,4	3,4	7,0	4,9
33	2,1	3,5	2,8	2,6	2,8	6,3	4,5	4,3	4,8	5,0
34	1,4	2,2	3,7	2,4	2,4	4,5	4,6	3,8	4,9	4,4
35	1,6	2,2	0,5	2,1	1,6	5,5	4,6	3,9	4,7	4,7
36	1,5	2,4	2,3	2,4	2,2	3,8	3,8	3,9	5,1	4,1
37	1,4	1,5	2,3	2,2	1,9	4,2	4,2	3,4	5,4	4,3

TIEMPO DE REACCIÓN (MINUTOS)										
Simulación	PA 0	PA 1	PA 2	PA 3	MEDIA PA	BA 0	BA 1	BA 2	BA 3	MEDIA BA
2	5,7	9,3	6,8	8,1	7,4	5,6	4,8	10,3	11,5	8,0
3	2,9	3,0	3,4	3,2	3,1	5,0	5,5	6,2	7,0	5,9
4	3,5	3,7	5,8	3,3	4,1	3,8	5,9	3,3	7,2	5,1
6	2,1	2,3	2,7	2,2	2,3	4,3	5,5	3,6	5,8	4,8
7	4,2	2,3	2,2	2,2	2,7	2,5	4,3	3,0	4,1	3,5
8	3,7	3,2	2,8	2,3	3,0	6,1	3,8	3,8	4,4	4,5
9	3,3	3,1	3,4	4,3	3,5	4,3	5,3	2,8	4,1	4,1
10	3,3	2,8	3,3	2,9	3,1	3,8	4,8	3,5	4,6	4,2
11	3,3	3,2	3,8	3,3	3,4	3,8	3,8	3,6	3,3	3,6
12	2,8	2,8	2,9	3,0	2,9	3,2	2,5	3,6	2,6	3,0
13	3,3	2,3	2,7	4,0	3,1	3,8	4,8	5,1	5,6	4,8
14	3,8	3,4	3,6	3,7	3,6	2,9	3,0	3,2	2,5	2,9
15	2,9	3,3	3,3	2,8	3,1	2,7	2,0	2,0	2,4	2,3
16	3,0	3,5	2,8	2,8	3,0	2,3	2,3	2,4	2,3	2,3
17	4,6	3,8	2,9	3,2	3,6	2,6	3,0	3,5	2,4	2,9
18	3,2	3,6	2,8	3,2	3,2	1,6	4,0	2,8	2,1	2,6
19	3,5	2,6	2,7	3,8	3,2	2,7	1,8	2,6	2,6	2,4
20	3,6	4,0	4,4	3,5	3,9	2,2	2,8	3,4	2,0	2,6
21	2,8	3,3	4,5	3,8	3,6	2,0	3,3	2,9	2,5	2,7
22	3,3	3,8	3,3	4,8	3,8	3,6	3,1	4,3	2,3	3,3
23	5,6	5,3	4,8	4,8	5,2	3,3	3,9	3,9	1,8	3,2
24	3,5	3,0	4,3	4,7	3,9	1,5	3,1	3,5	1,7	2,4
25	3,7	4,1	4,3	5,3	4,3	3,3	2,9	3,0	1,9	2,8
26	4,8	3,7	4,2	4,3	4,2	6,0	3,7	2,7	1,6	3,5
27	3,7	3,8	2,9	3,7	3,5	2,8	2,3	1,0	1,8	2,0
28	4,3	4,0	2,9	4,0	3,8	2,3	2,3	1,2	1,9	1,9
29	4,3	3,8	2,5	3,6	3,6	3,2	3,1	1,2	1,7	2,3
30	3,8	3,1	2,8	4,1	3,4	3,4	2,3	1,8	1,4	2,2
31	2,9	4,3	3,8	3,6	3,7	2,8	3,3	1,7	1,8	2,4
32	3,8	4,3	3,2	3,5	3,7	1,6	3,5	1,8	2,1	2,2
33	4,2	3,7	4,0	4,3	4,0	1,6	2,3	1,3	1,5	1,7
34	4,6	4,4	3,6	4,3	4,2	2,8	2,4	1,4	1,2	1,9
35	3,8	4,3	4,5	3,7	4,1	2,7	2,8	2,2	1,3	2,2
36	3,8	3,8	3,8	4,2	3,9	2,1	1,8	1,3	1,3	1,6
37	3,7	4,6	3,4	4,4	4,0	1,6	2,1	1,2	1,7	1,6

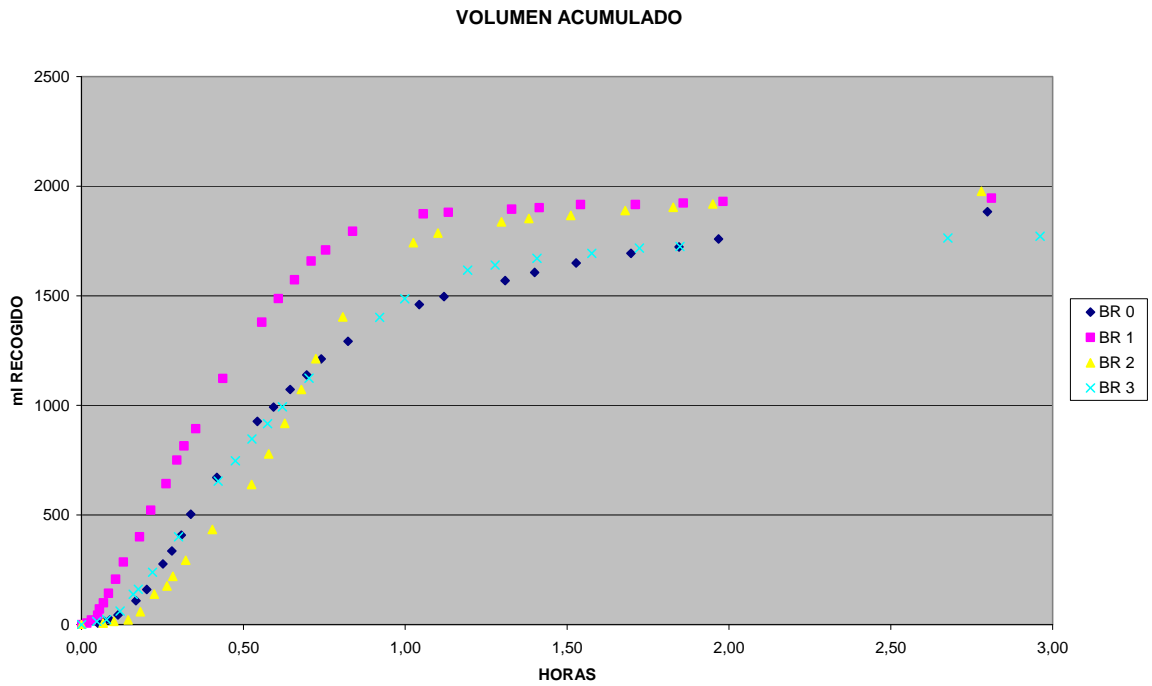
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 4.



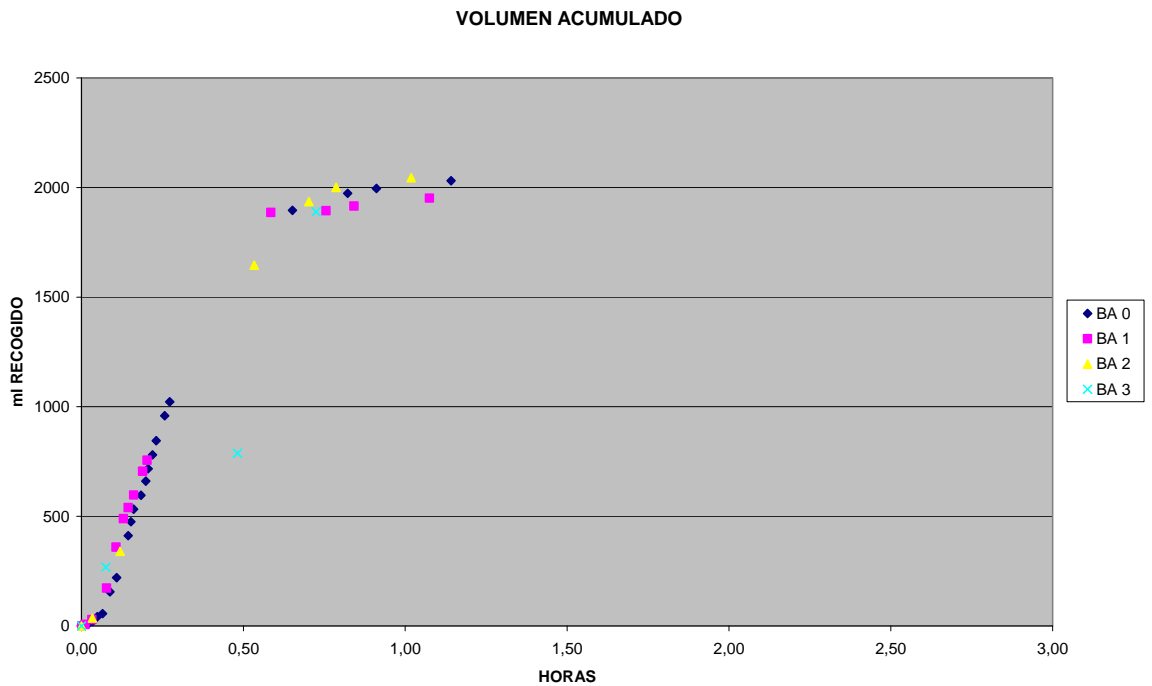
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 5.



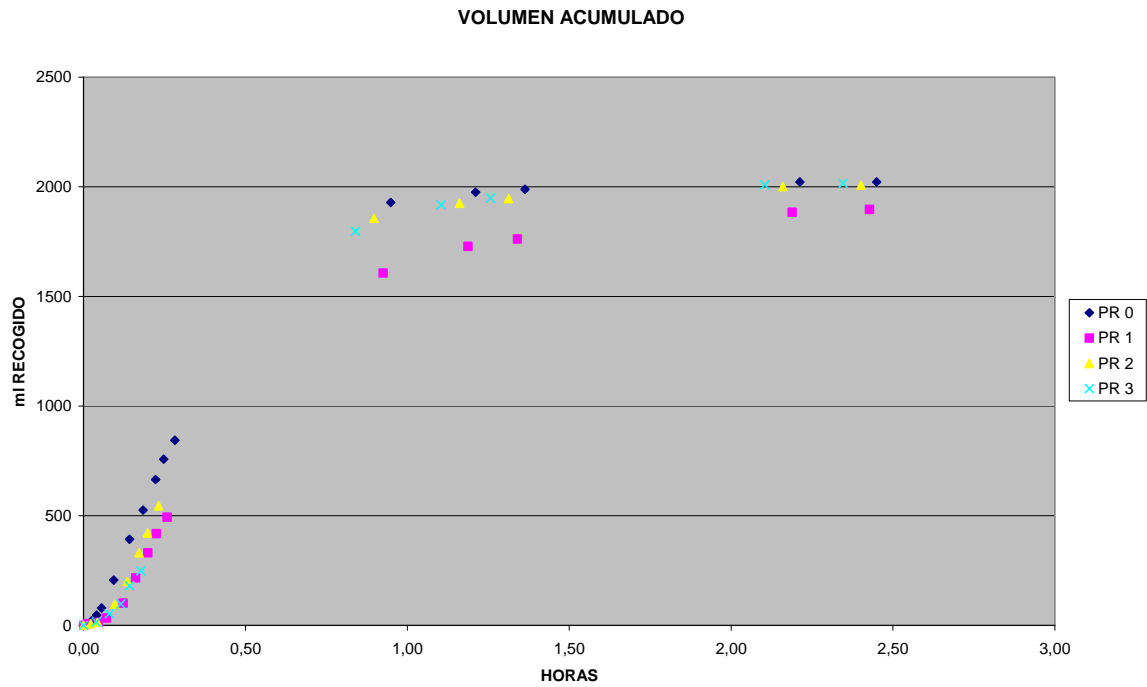
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 6.



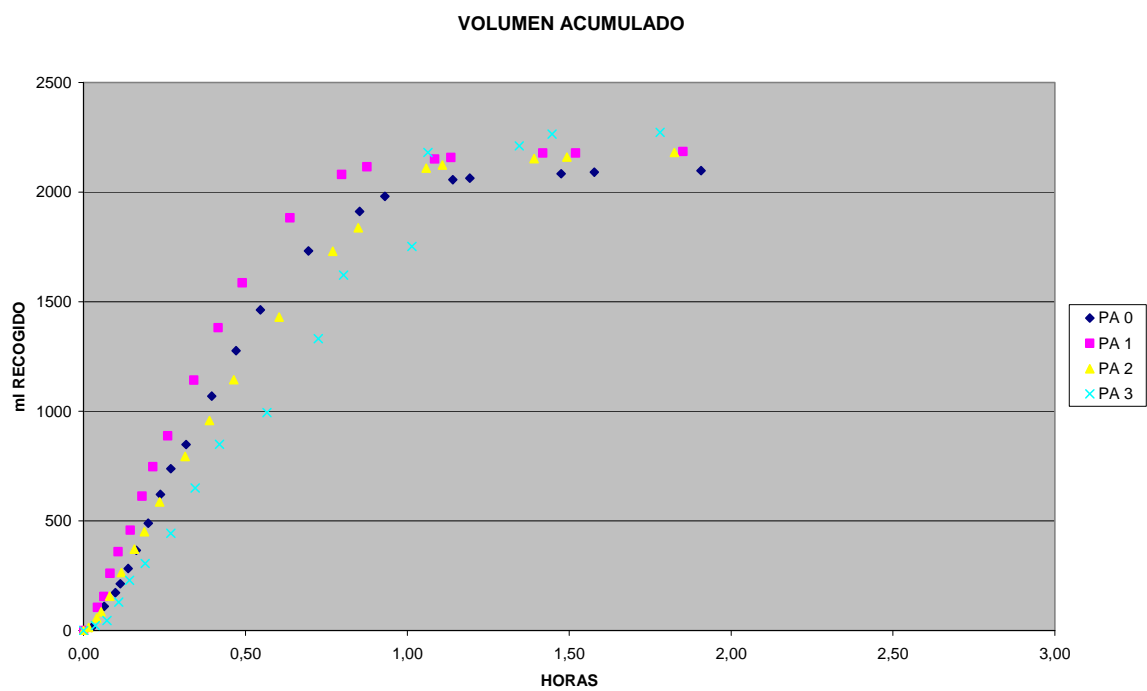
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 7.



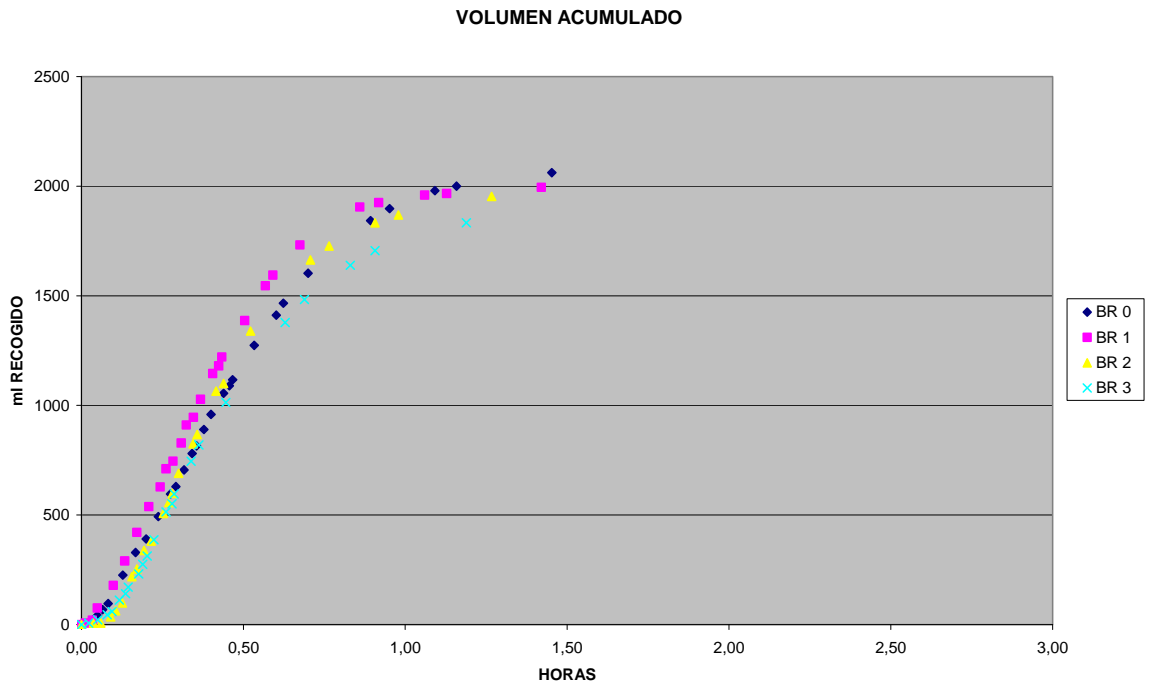
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 8.



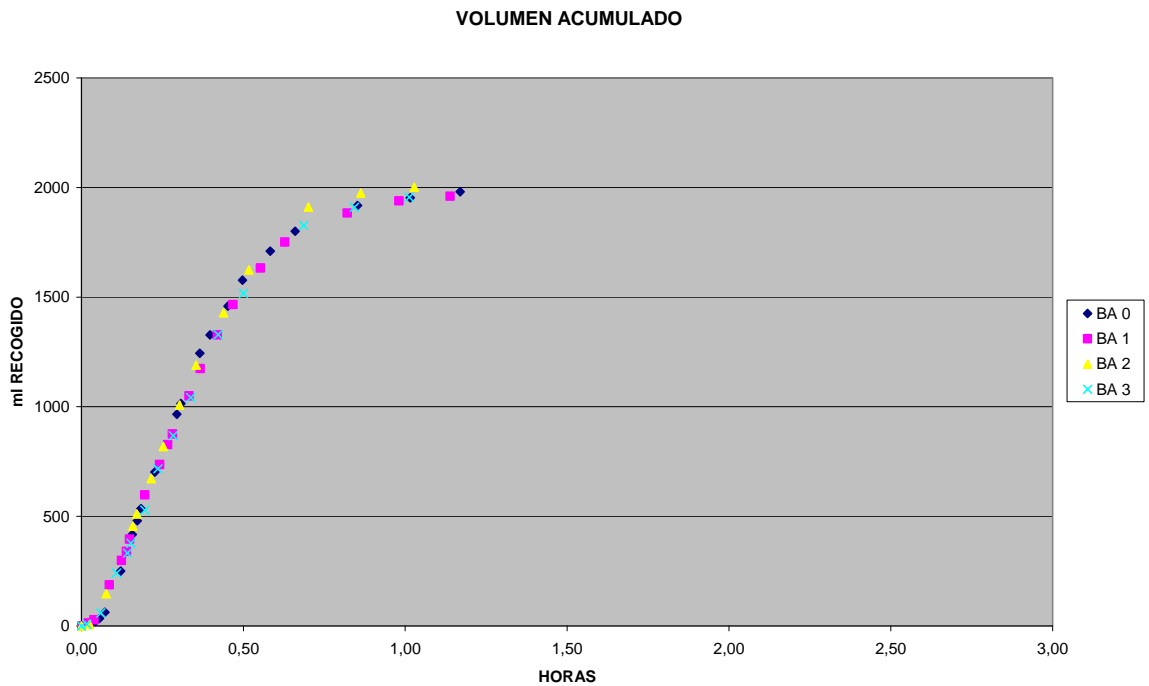
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 9.



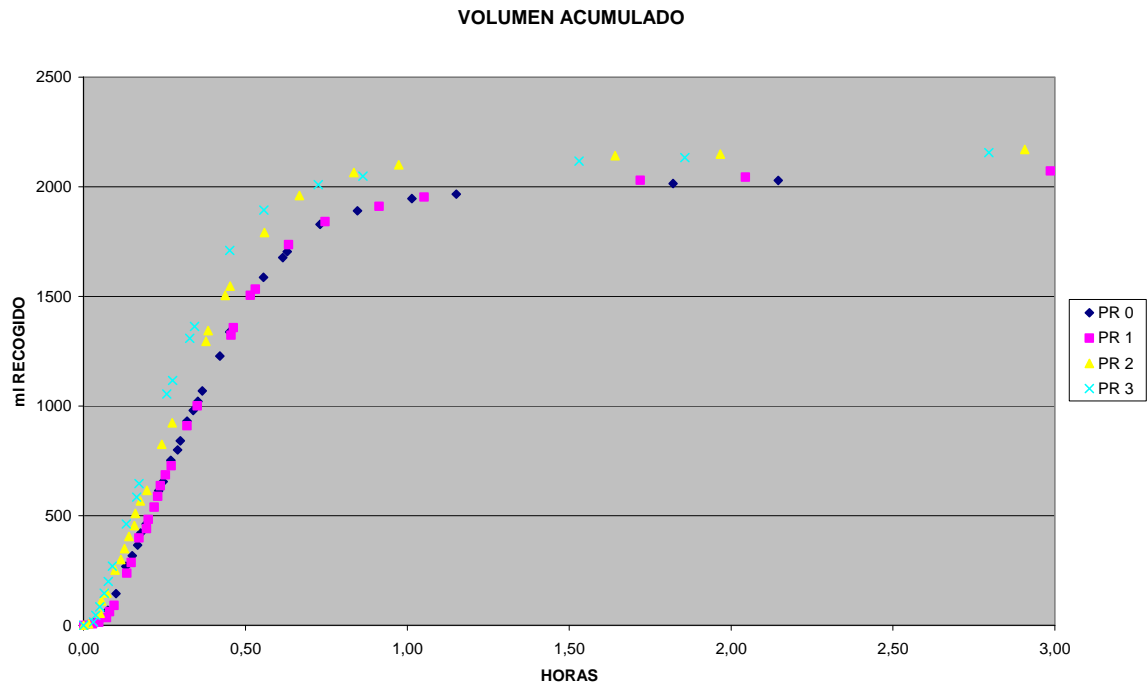
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 10.



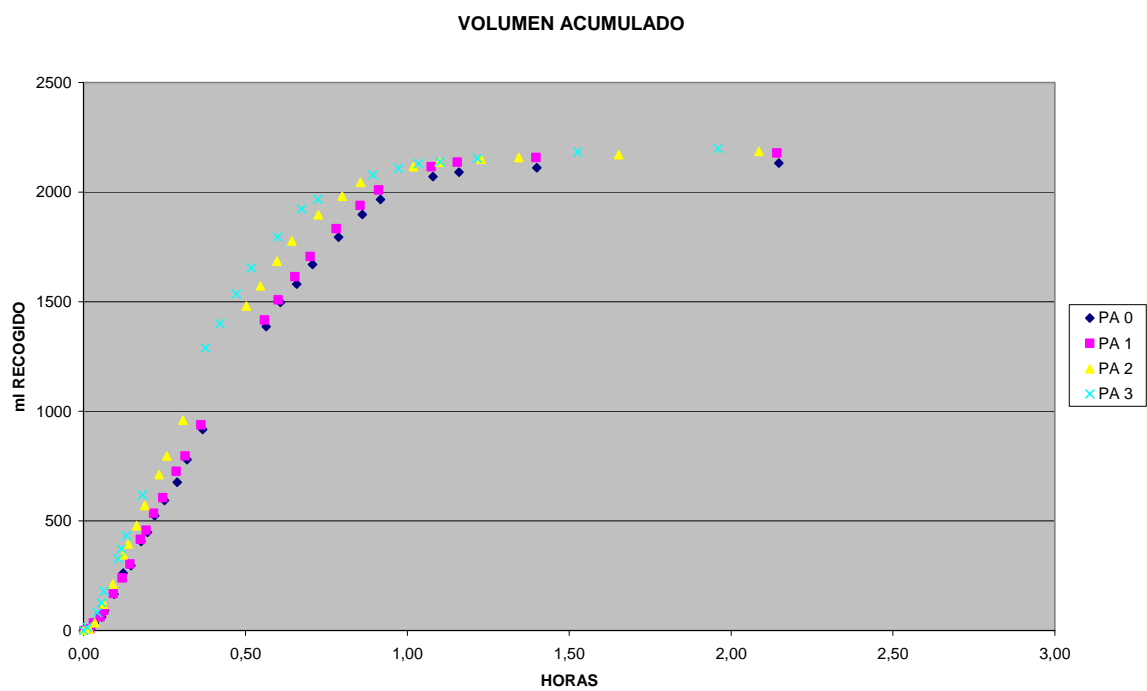
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 11.



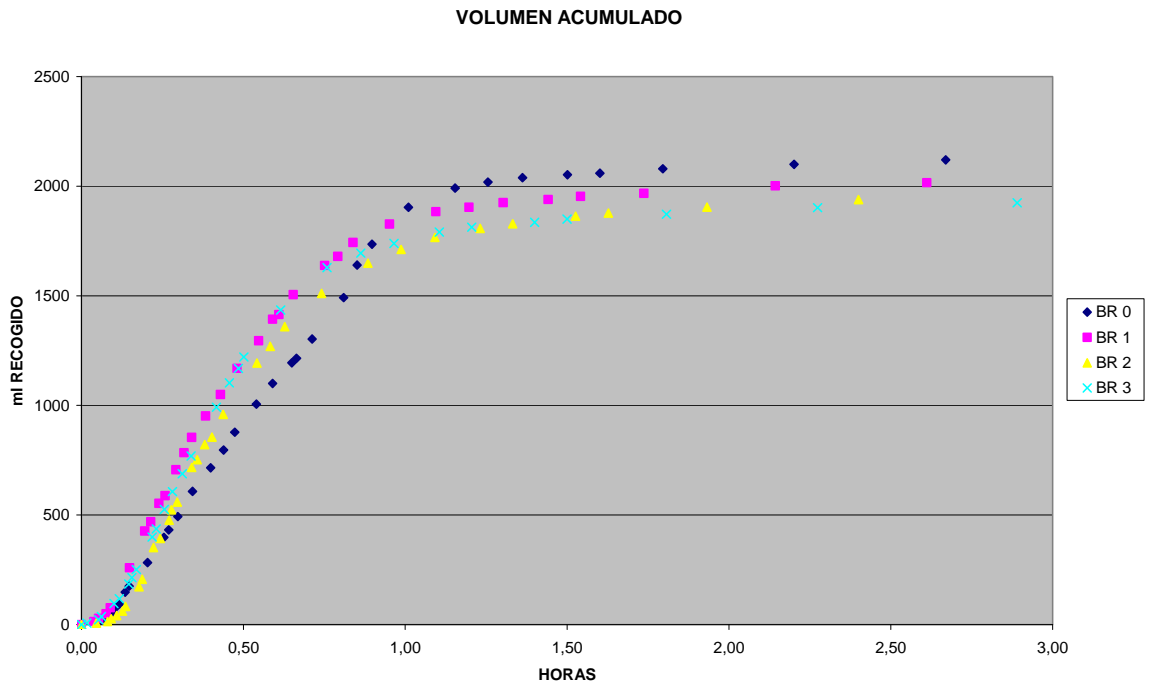
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 12.



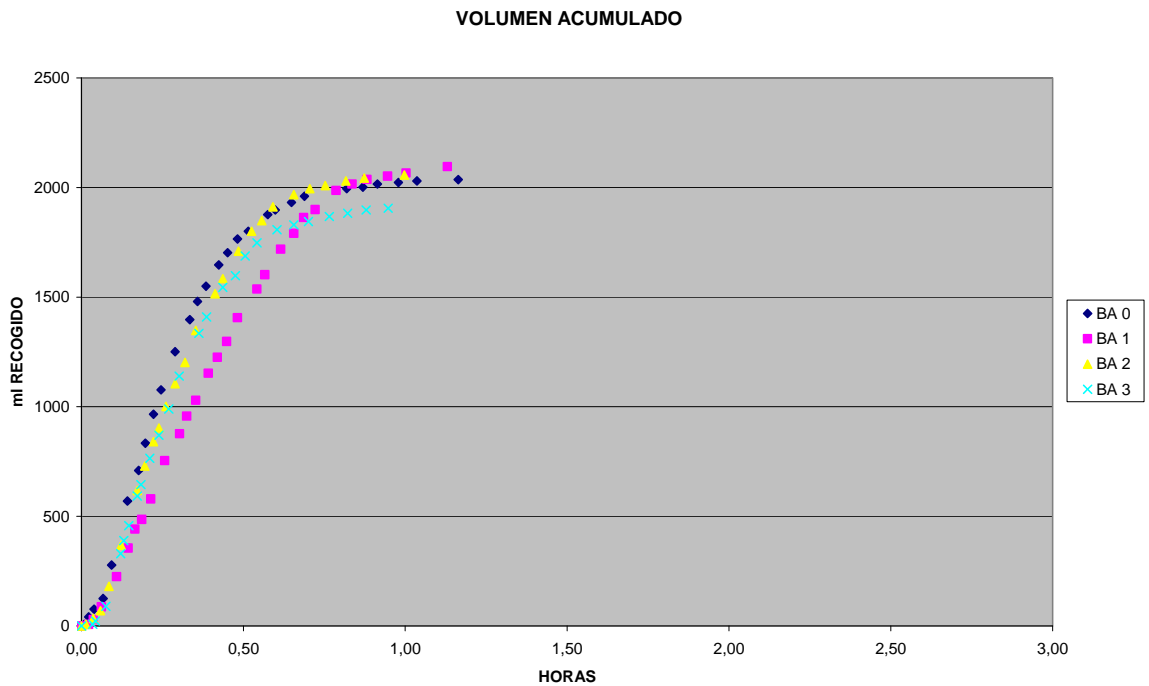
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 13.



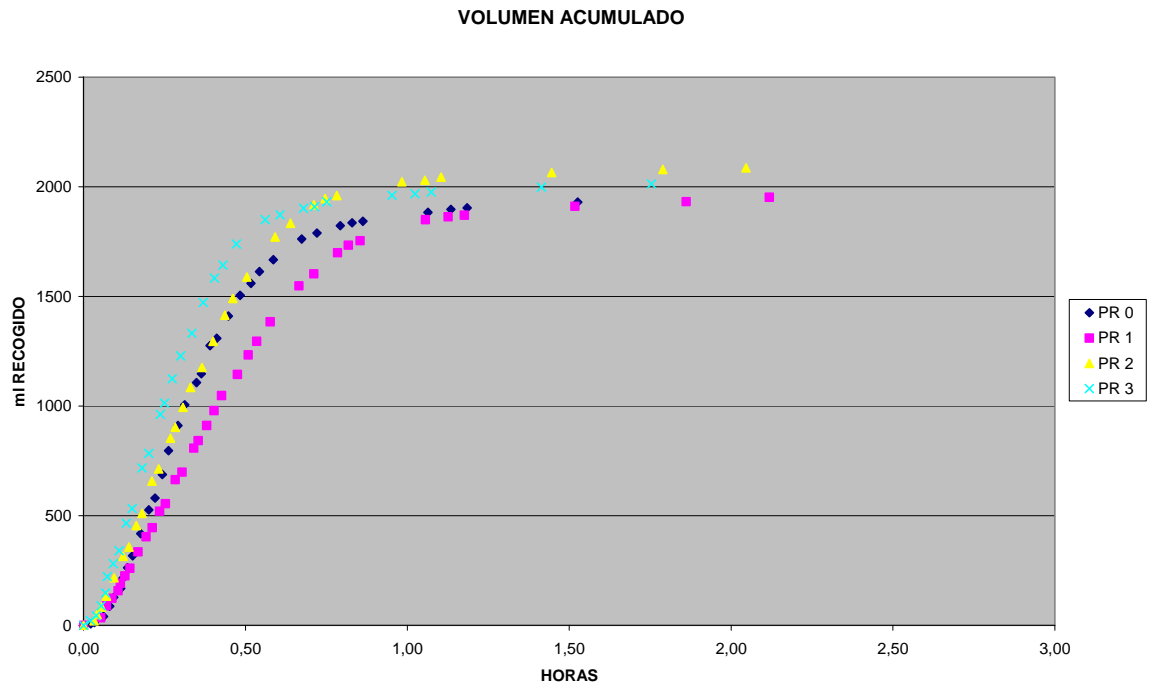
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 14.



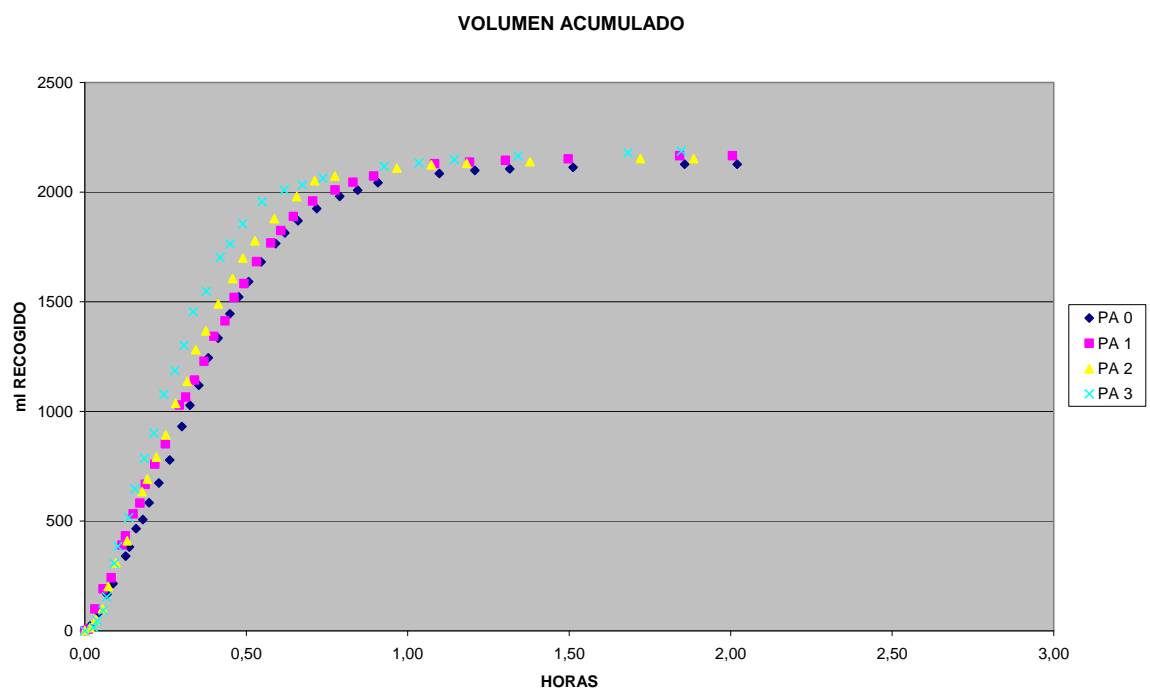
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 15.



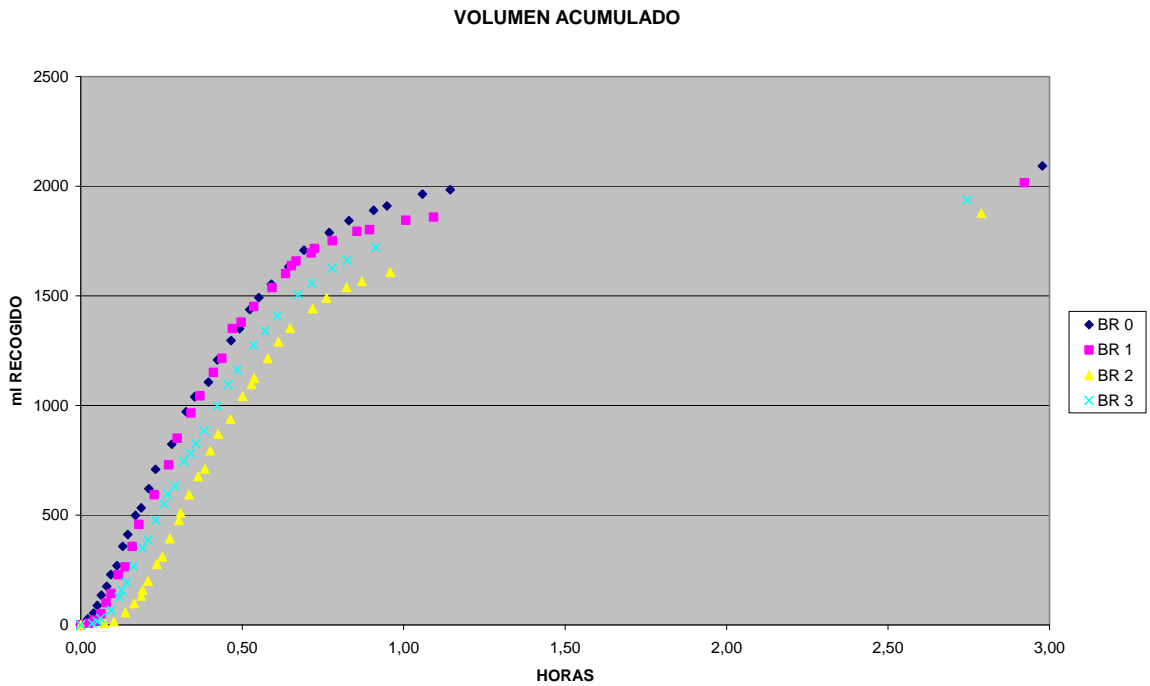
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 16.



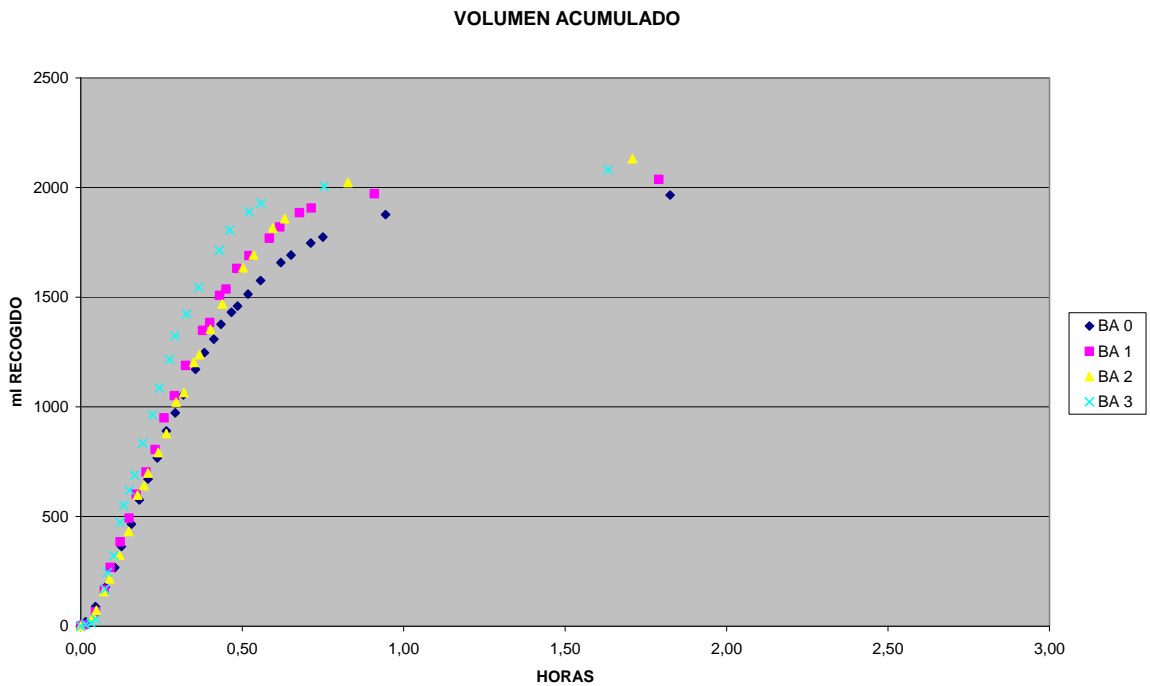
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 17.



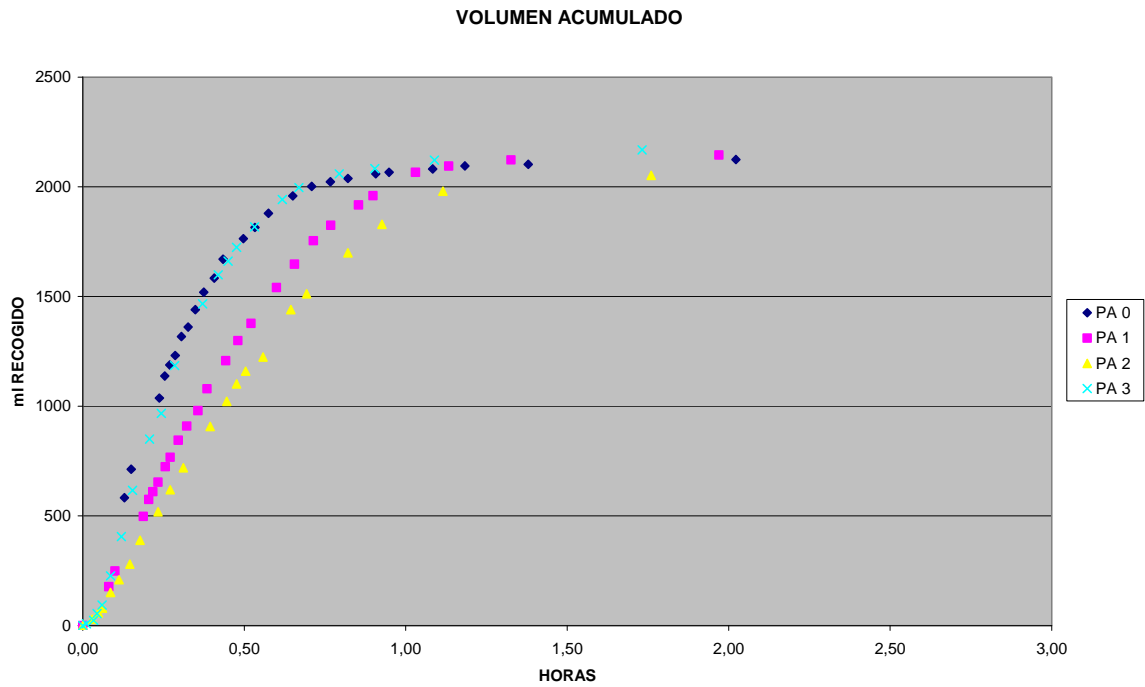
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 18.



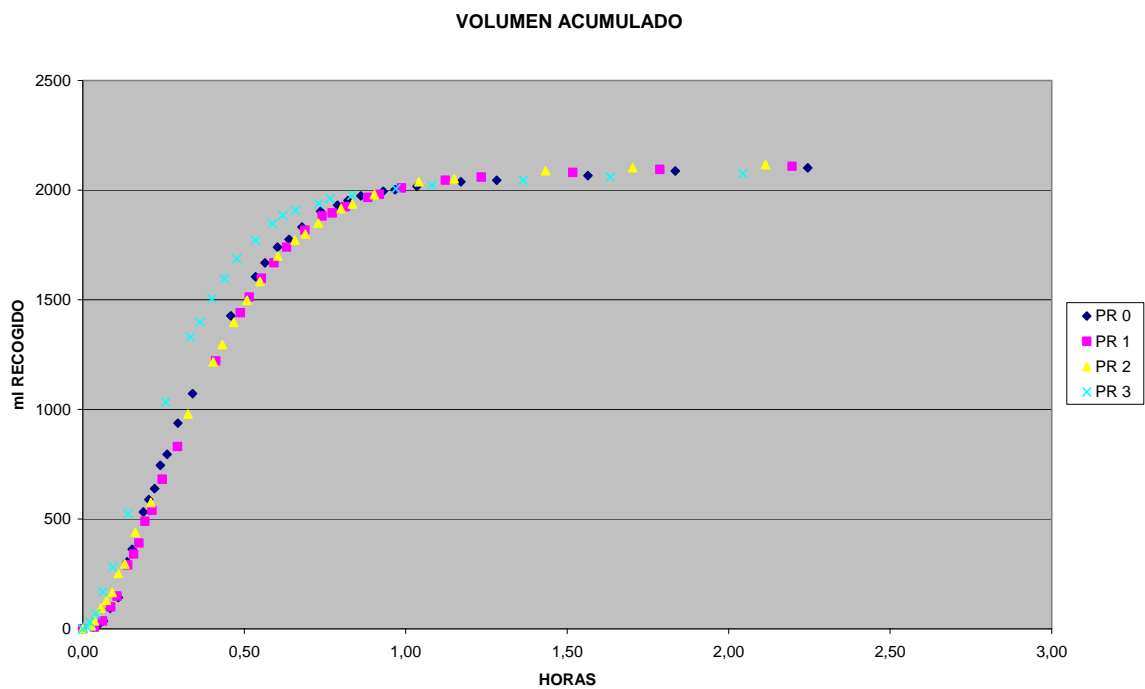
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 19.



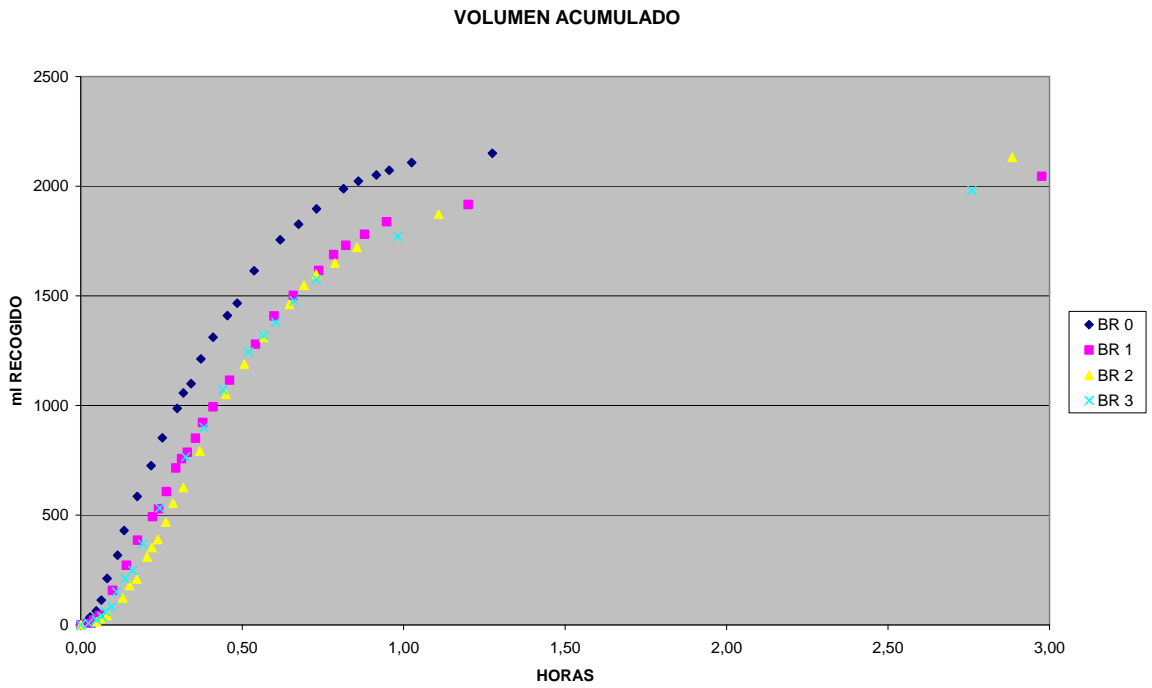
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 20.



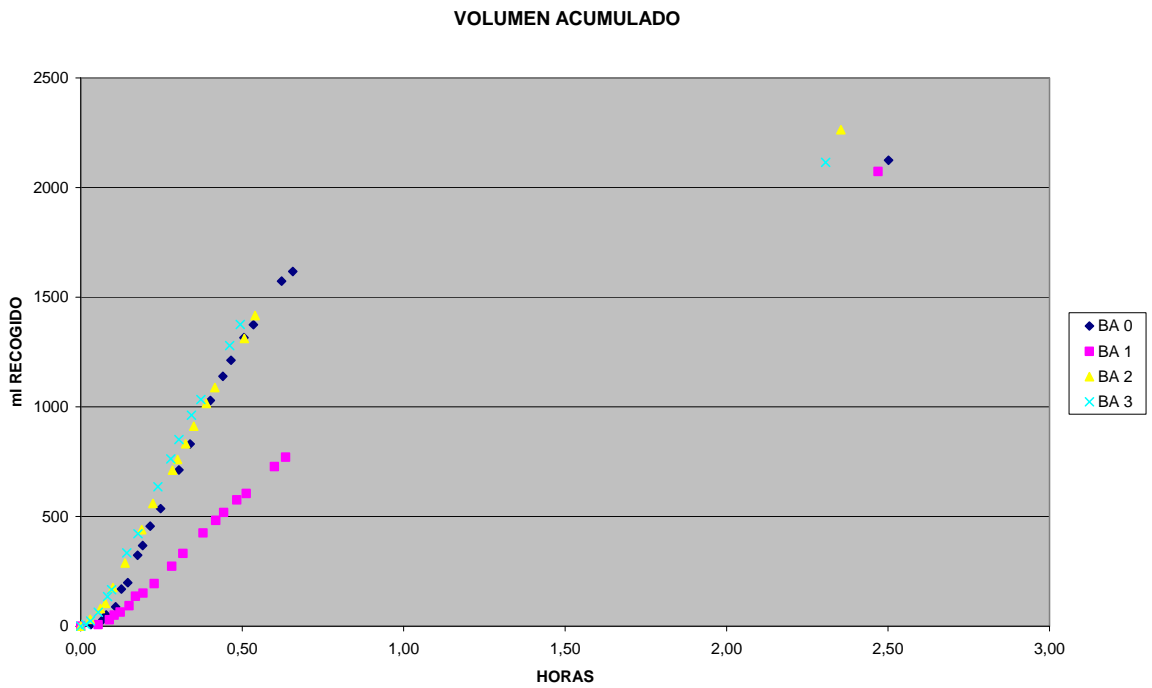
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 21.



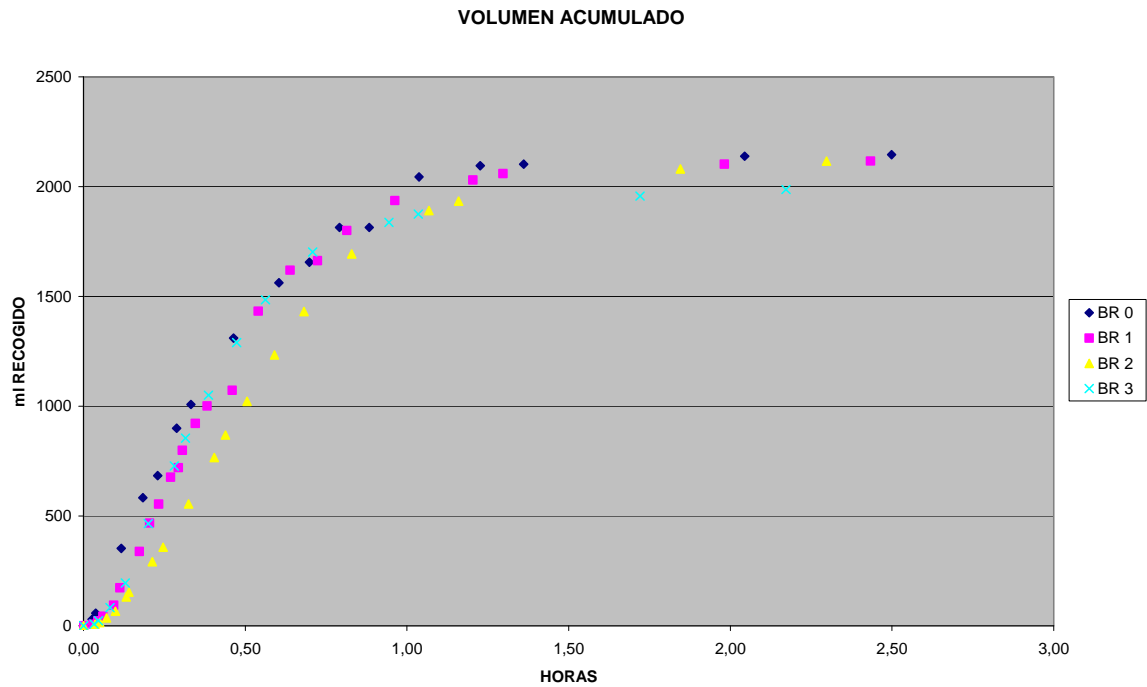
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 22.



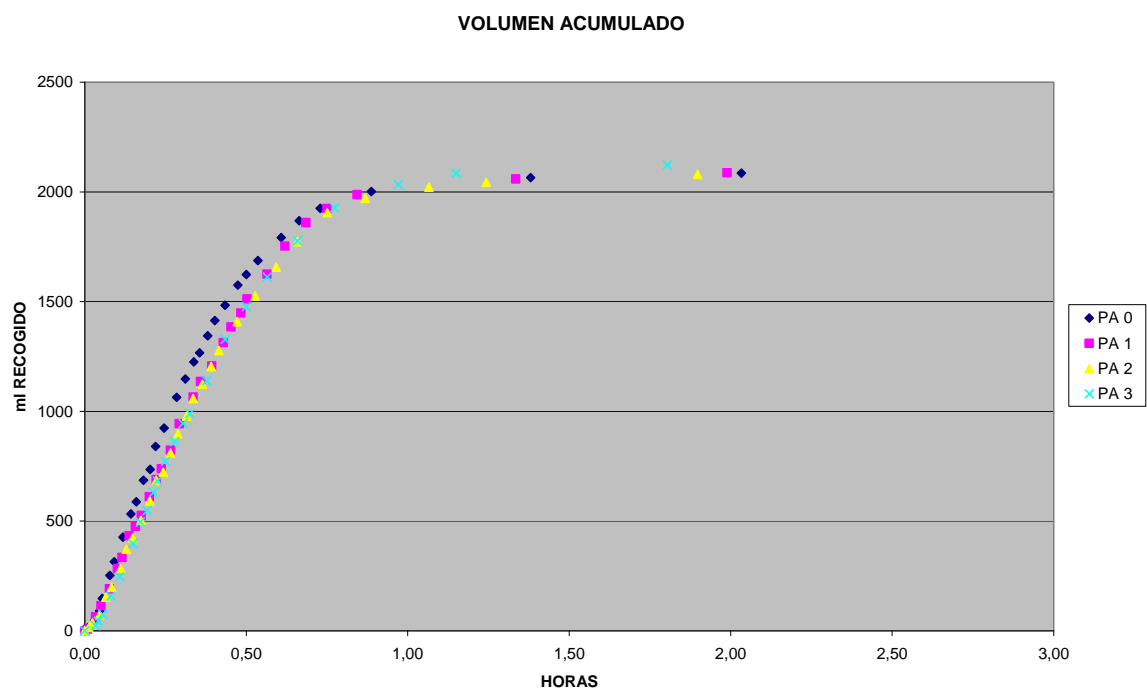
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 23.



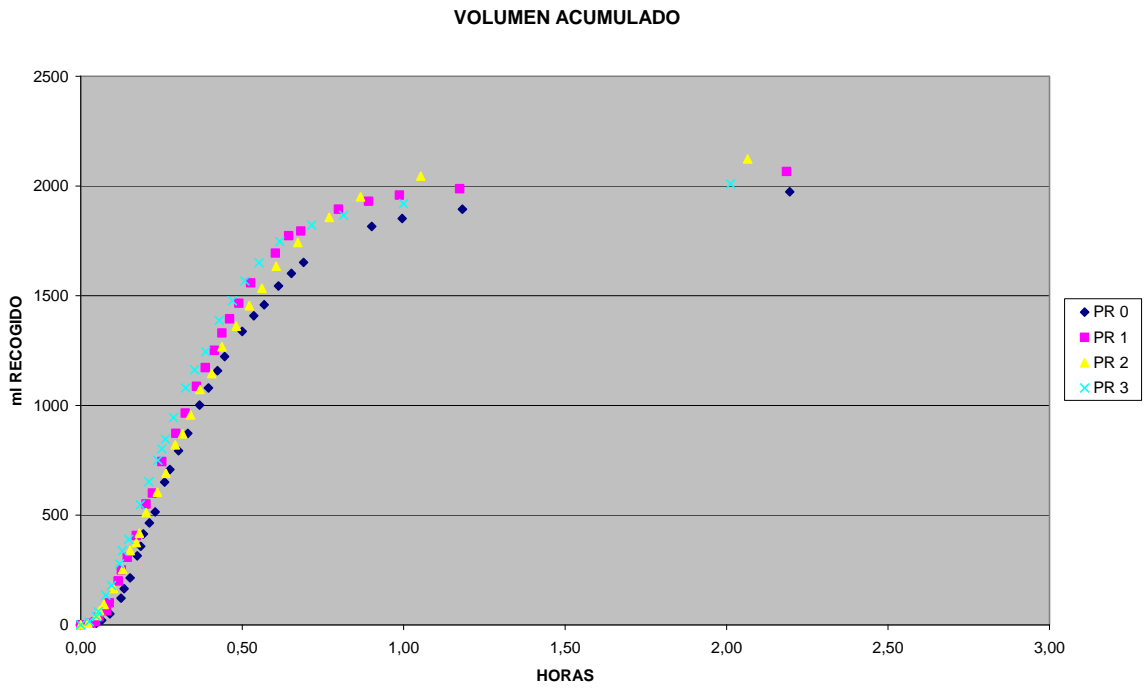
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 24.



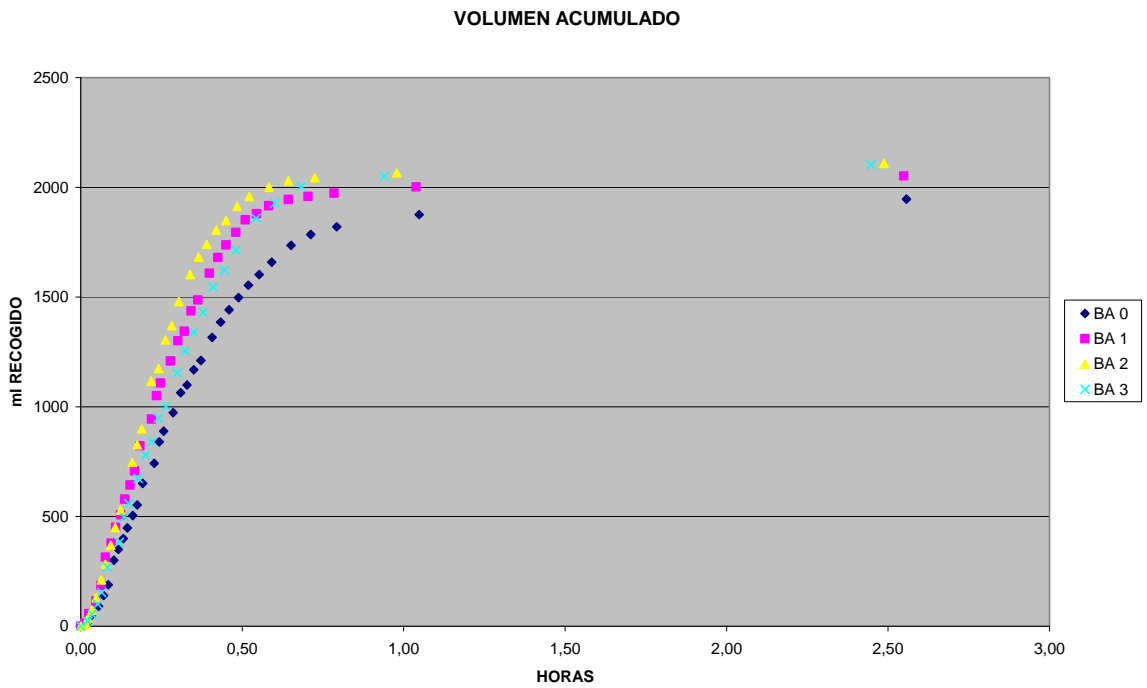
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 25.



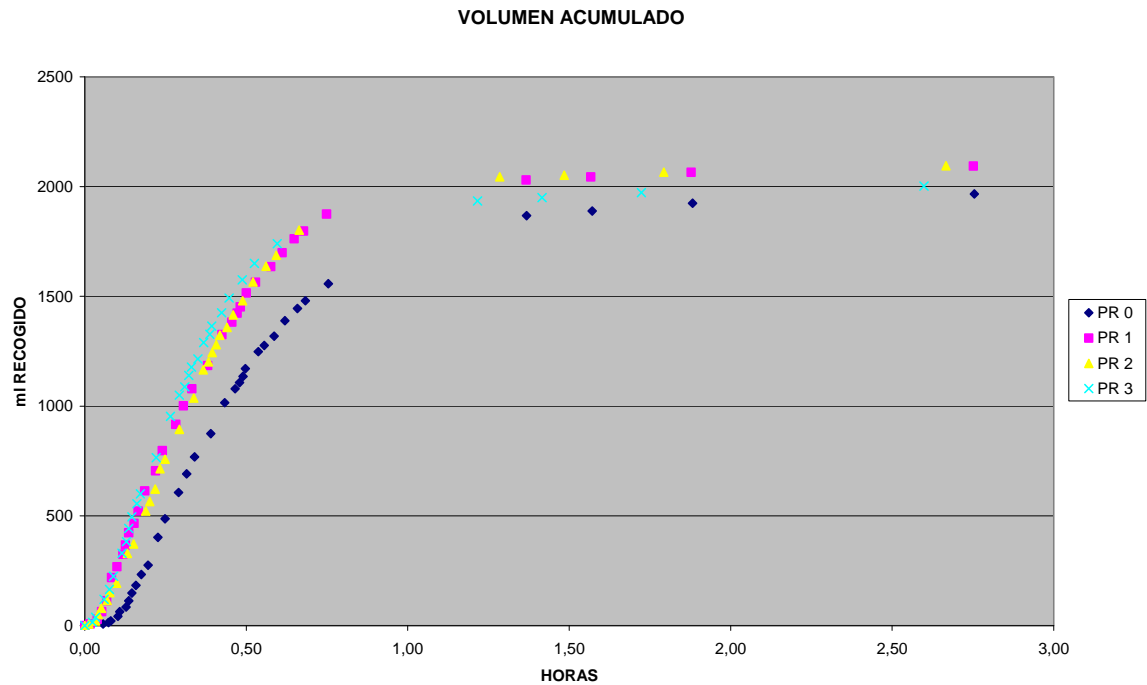
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 26.



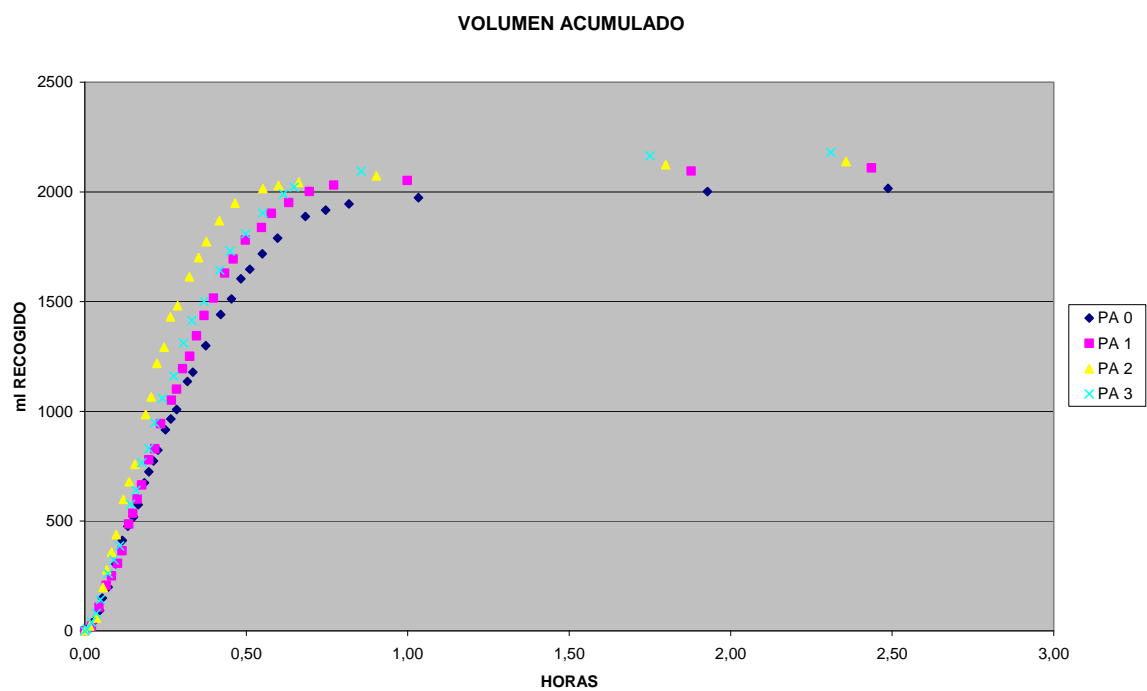
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 27.



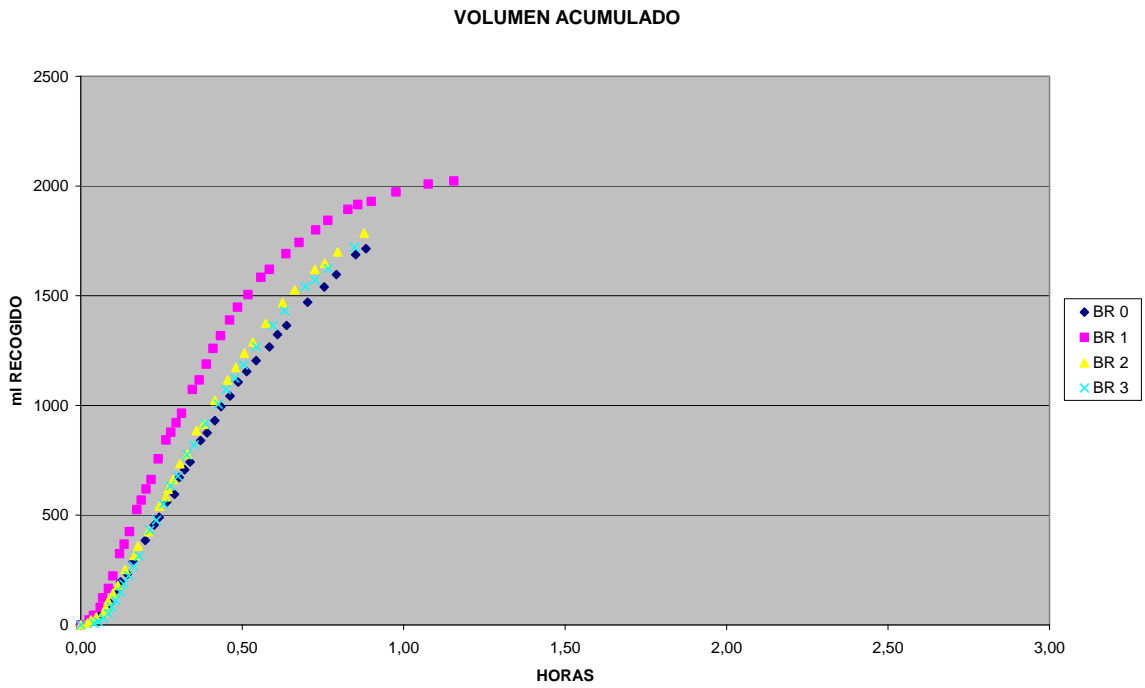
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 28.



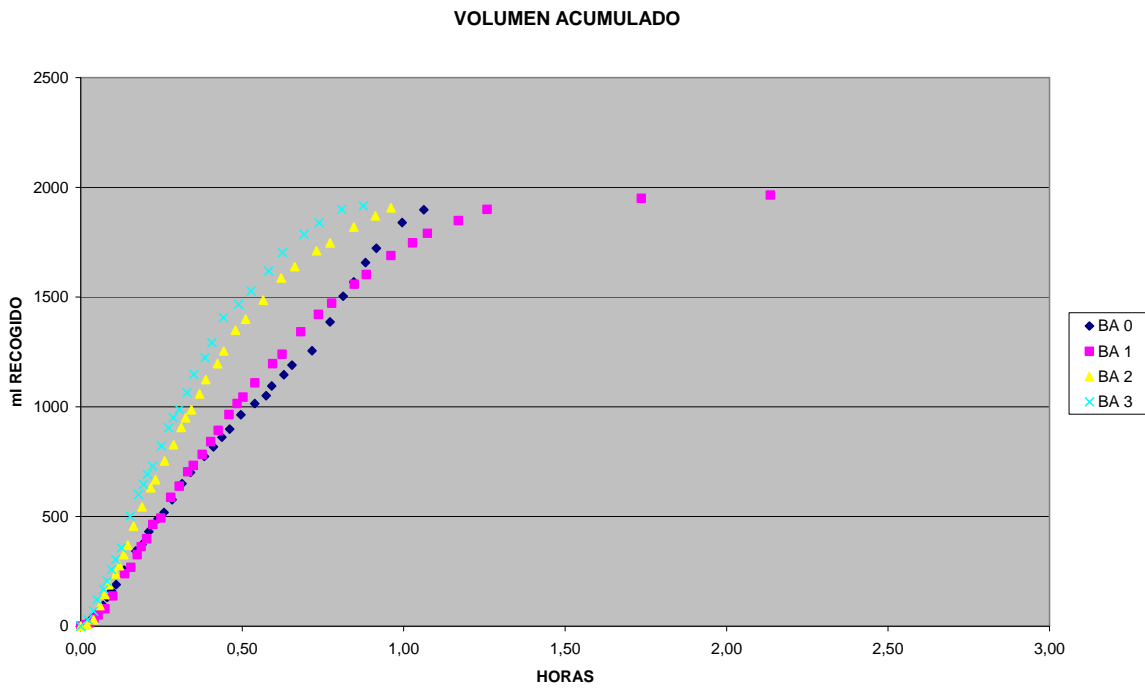
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 29.



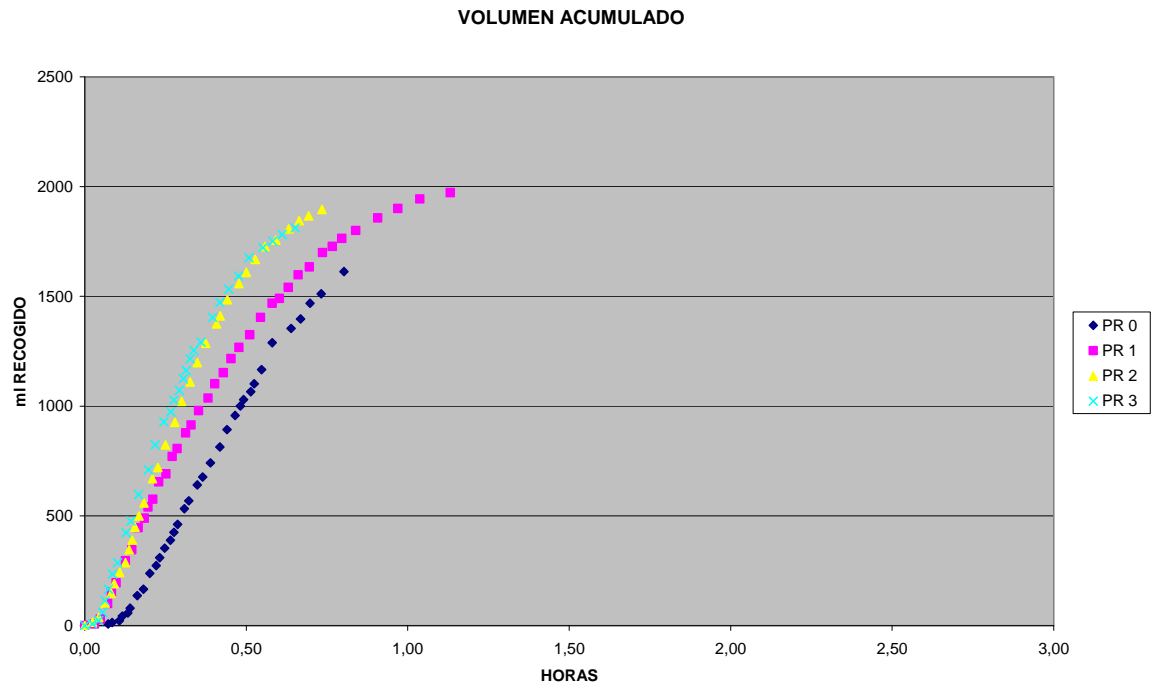
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 30.



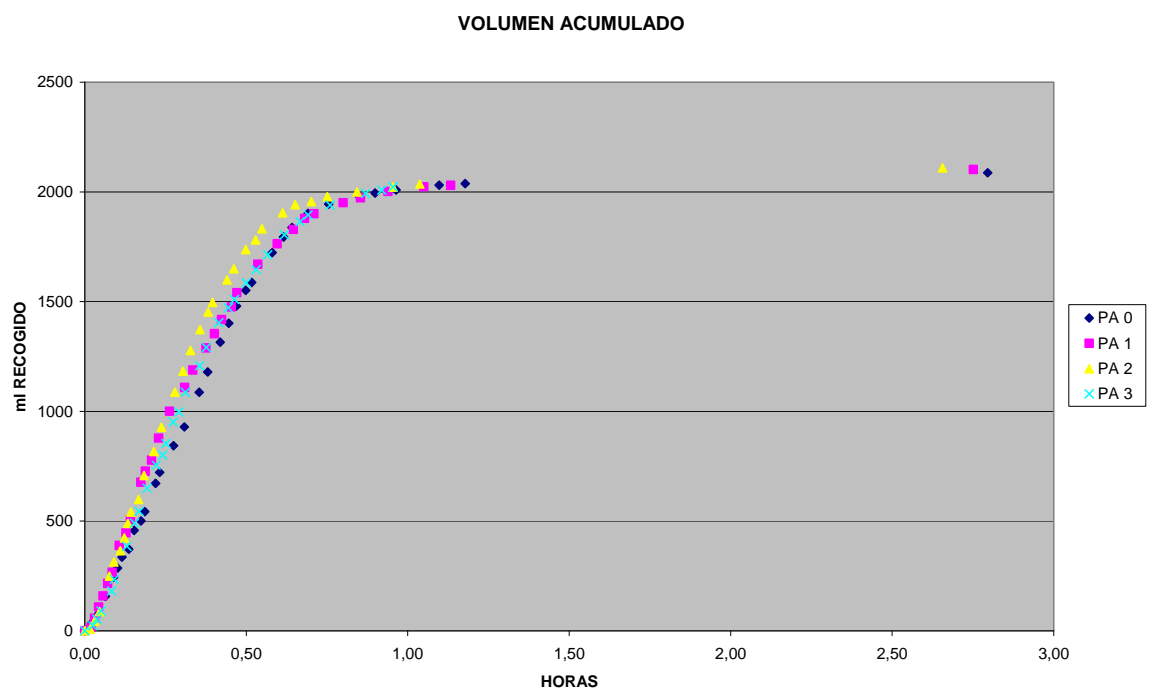
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 31.



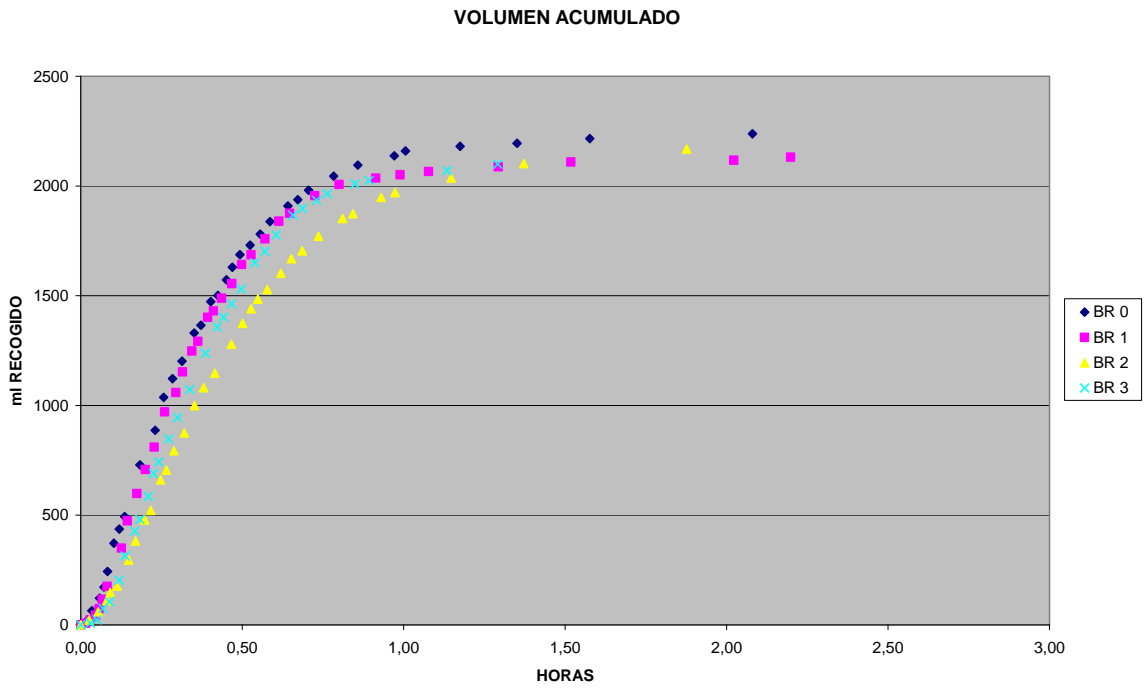
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 32.



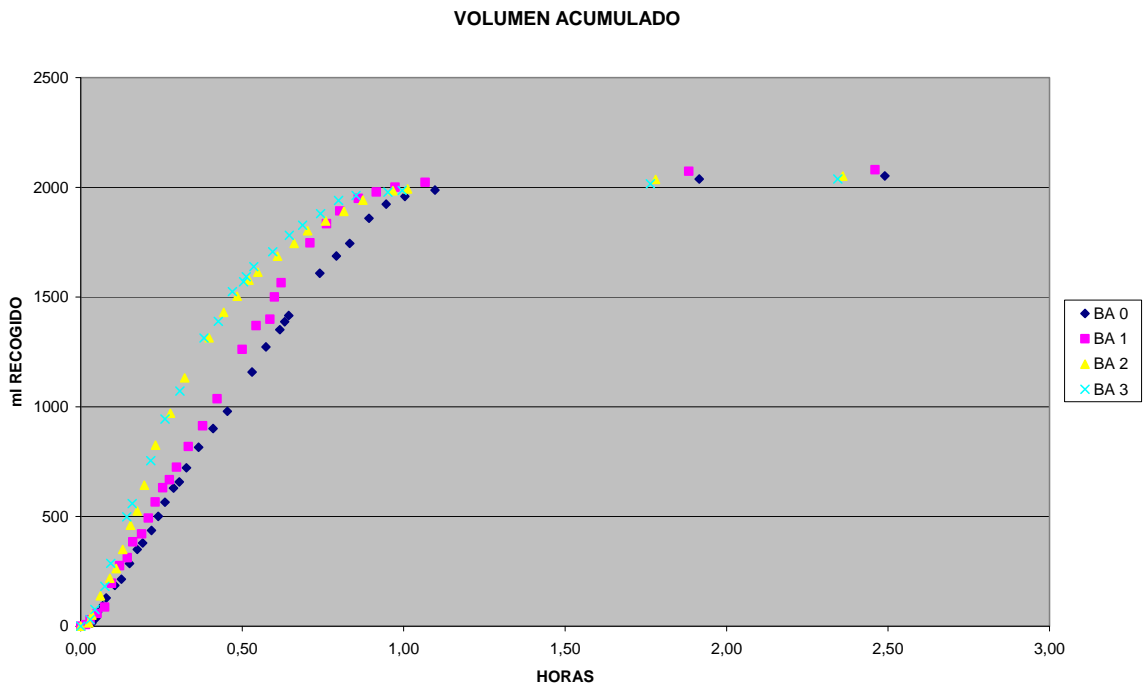
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 33.



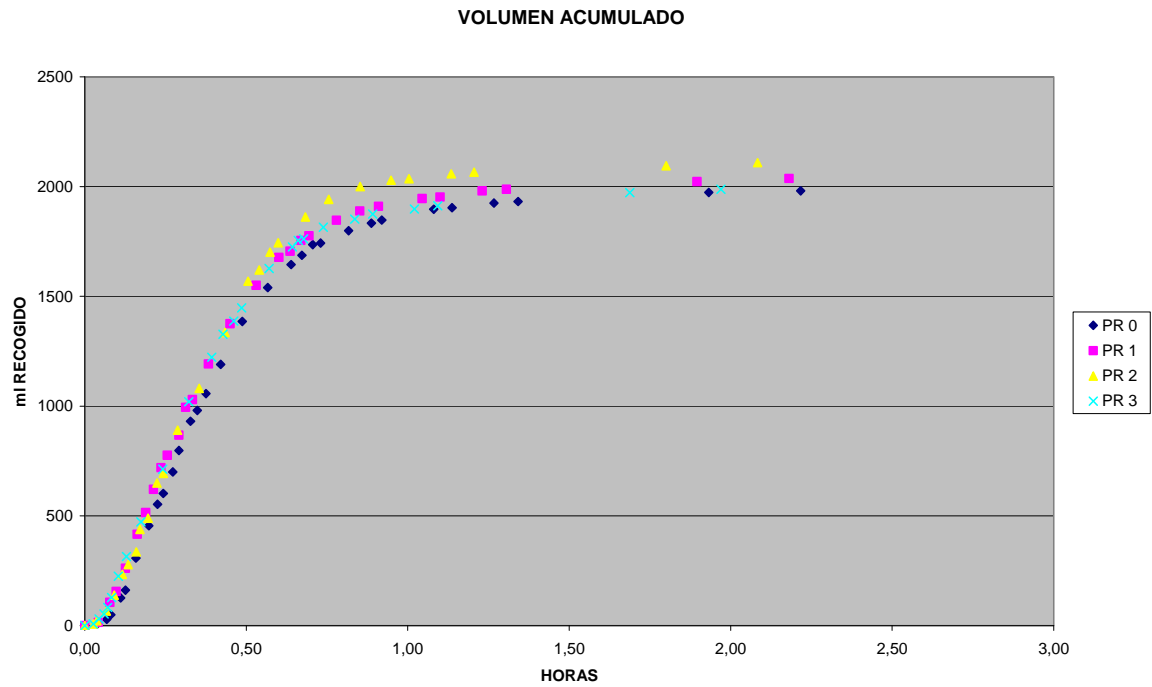
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 34.



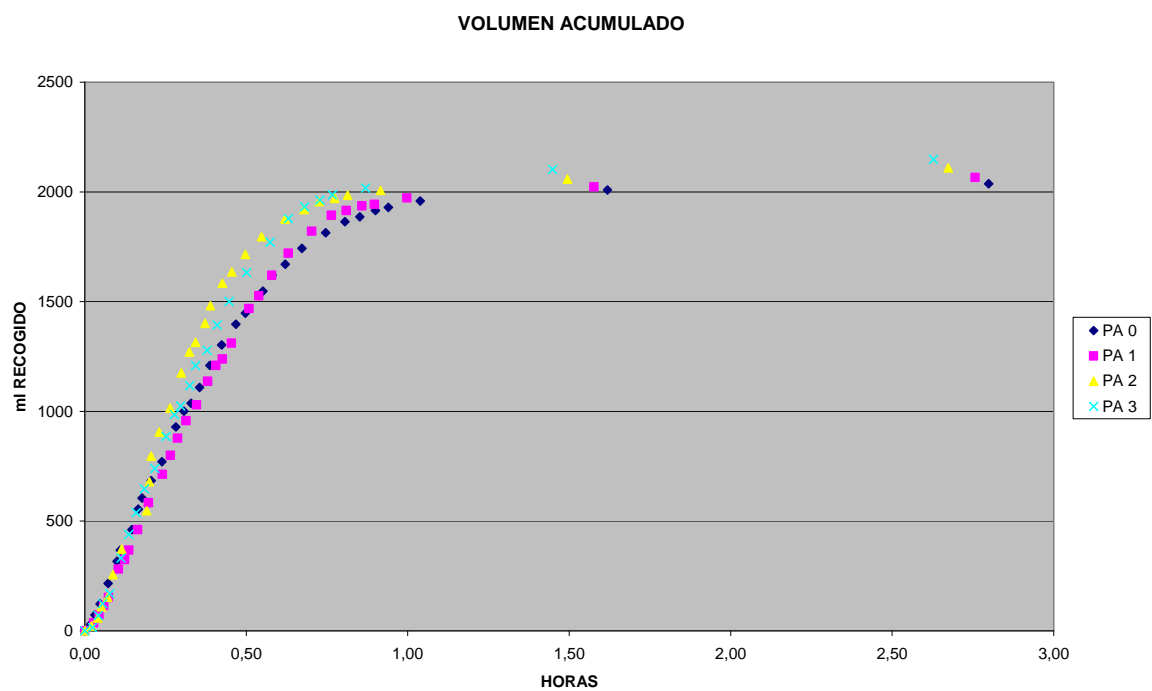
Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 35.



Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 36.



Volumen acumulado (ml) en las 3 primeras horas después de la simulación 37.



PORCENTAJE INFILTRADO AL CABO DE 48 HORAS (%)										
Simulación	BR 0	BR 1	BR 2	BR 3	MEDIA BR	PR 0	PR 1	PR 2	PR 3	MEDIA PR
2	77,8	54,4	63,1	68,1	65,9	66,2	67,8	71,2	71,4	69,2
3	86,0	81,5	66,7	71,9	76,5	75,7	81,2	78,6	74,8	77,5
4	90,9	77,1	86,9	85,9	85,2	84,5	86,0	85,6	84,5	85,1
5	88,6	78,3	85,1	79,3	82,8	84,3	86,2	88,6	85,7	86,2
6	90,9	83,2	91,0	79,8	86,2	88,2	89,0	89,5	92,3	89,7
7	95,3	84,0	91,6	86,1	89,3	87,7	88,7	90,1	88,6	88,8
8	89,9	84,5	87,2	86,1	86,9	86,2	87,2	88,1	86,7	87,0
9	90,5	92,1	96,8	89,3	92,2	88,8	87,4	89,1	87,7	88,3
10	94,5	88,1	92,1	89,9	91,2	88,5	89,6	91,0	87,3	89,1
11	90,2	90,4	92,7	87,2	90,1	87,8	87,5	89,1	87,2	87,9
12	90,7	89,0	95,2	88,6	90,9	87,6	89,0	90,0	87,8	88,6
13	92,3	87,6	86,3	87,3	88,4	86,9	86,7	89,1	88,1	87,7
14	89,8	87,3	91,8	86,3	88,8	85,8	86,6	87,5	85,6	86,4
15	90,3	91,1	88,5	89,9	89,9	87,8	87,8	89,4	87,5	88,1
16	88,4	85,7	87,1	85,4	86,7	86,1	76,7	87,4	85,7	84,0
17	90,6	89,5	91,1	87,5	89,7	87,8	88,8	90,4	89,1	89,0
18	88,7	87,4	88,2	85,8	87,5	87,1	87,8	89,5	88,2	88,1
19	90,6	87,9	89,9	87,5	89,0	86,8	88,0	88,8	87,9	87,9
20	89,8	88,1	91,1	88,0	89,3	88,8	87,8	89,5	88,7	88,7
21	94,3	89,9	92,0	89,9	91,5	89,1	88,8	89,8	88,4	89,0
22	91,0	88,9	90,7	87,8	89,6	87,8	88,1	88,7	88,1	88,2
23	92,1	89,9	92,6	90,7	91,3	89,1	88,6	89,1	88,0	88,7
24	92,3	90,9	91,8	91,5	91,6	88,7	89,2	90,1	89,2	89,3
25	91,0	87,2	89,5	86,5	88,6	86,8	87,0	87,5	86,3	86,9
26	91,0	89,9	92,9	89,8	90,9	87,0	89,2	89,9	87,8	88,5
27	90,2	89,3	90,7	88,8	89,7	85,5	87,6	88,8	87,8	87,4
28	92,0	88,3	89,5	88,4	89,6	85,5	87,7	88,0	86,2	86,9
29	93,4	88,1	90,1	87,4	89,8	83,5	87,1	88,9	86,1	86,4
30	91,2	89,3	88,1	88,3	89,2	87,0	89,5	88,2	89,3	88,5
31	92,3	90,6	92,0	89,8	91,2	87,1	89,6	89,9	88,2	88,7
32	92,7	89,7	92,2	90,3	91,2	87,8	89,6	89,5	88,5	88,8
33	91,2	89,3	90,6	88,2	89,8	86,0	87,8	88,7	87,0	87,4
34	92,5	89,9	91,9	90,8	91,2	88,1	89,3	89,7	88,2	88,8
35	93,3	92,3	93,6	91,8	92,7	88,0	88,4	90,7	88,6	88,9
36	92,0	89,9	90,9	89,6	90,6	87,0	86,7	88,3	87,0	87,2
37	93,3	91,7	91,8	91,0	91,9	87,0	87,6	88,6	87,3	87,7

PORCENTAJE INFILTRADO AL CABO DE 48 HORAS (%)										
Simulación	PA 0	PA 1	PA 2	PA 3	MEDIA PA	BA 0	BA 1	BA 2	BA 3	MEDIA BA
2	84,5	83,7	84,1	87,0	84,8	79,5	83,4	88,4	82,6	83,5
3	86,9	87,8	88,0	88,8	87,9	82,9	82,6	81,0	80,5	81,8
4	86,6	87,7	87,1	88,7	87,5	85,3	83,4	85,9	79,9	83,6
5	88,7	88,3	88,1	89,1	88,6	86,1	85,0	86,0	84,0	85,3
6	90,4	91,1	90,8	92,5	91,2	89,4	87,9	90,0	87,7	88,7
7	89,5	89,9	90,9	91,8	90,5	90,9	87,2	89,8	87,7	88,9
8	87,4	88,3	88,4	89,0	88,3	87,6	87,3	88,9	88,4	88,0
9	87,0	90,3	90,0	91,4	89,7	91,4	90,7	92,9	92,0	91,8
10	89,0	88,7	88,5	90,4	89,1	90,8	88,5	90,9	90,2	90,1
11	89,7	89,6	90,1	90,7	90,0	88,9	89,1	90,7	89,3	89,5
12	89,7	90,5	90,2	91,1	90,4	89,5	90,3	91,2	90,6	90,4
13	89,1	91,1	90,0	90,6	90,2	87,6	93,2	89,9	86,8	89,4
14	88,0	88,5	88,0	89,7	88,5	88,6	90,6	91,6	88,7	89,9
15	89,0	90,0	90,2	90,3	89,9	89,3	91,3	91,6	89,6	90,5
16	87,9	100,0	87,6	88,5	91,0	87,3	88,9	89,8	87,0	88,3
17	90,2	90,7	90,5	90,8	90,6	89,9	90,6	92,0	89,2	90,4
18	88,9	89,6	89,6	90,5	89,7	87,6	88,1	91,1	90,1	89,2
19	88,6	89,8	89,7	90,7	89,7	87,5	88,8	91,4	90,1	89,5
20	89,4	90,2	88,9	90,4	89,7	88,1	89,6	92,3	91,1	90,3
21	90,8	89,9	90,4	90,6	90,4	89,3	89,3	90,6	89,9	89,8
22	90,0	89,8	90,2	90,3	90,1	89,6	89,8	91,6	91,3	90,6
23	88,9	92,1	90,0	90,8	90,4	90,1	90,4	91,4	91,2	90,8
24	90,3	91,1	89,9	91,0	90,6	89,6	90,6	92,1	92,0	91,1
25	87,9	88,3	88,5	89,4	88,5	87,7	88,7	89,6	90,1	89,0
26	88,4	90,0	90,7	90,9	90,0	89,4	90,6	91,8	91,4	90,8
27	87,9	88,5	90,2	90,7	89,3	88,4	89,1	90,5	90,2	89,6
28	87,4	89,2	87,6	89,1	88,3	89,3	89,0	90,4	89,6	89,6
29	87,9	88,4	89,4	89,8	88,9	88,9	88,7	91,3	90,1	89,8
30	88,1	88,3	90,8	88,5	88,9	89,1	90,0	92,6	90,5	90,6
31	89,4	90,5	90,9	91,2	90,5	90,0	89,8	91,1	90,5	90,3
32	89,2	89,8	90,8	91,6	90,3	90,7	90,9	91,1	90,6	90,8
33	88,2	88,7	89,0	88,9	88,7	89,9	89,7	90,1	90,1	90,0
34	89,7	90,3	90,1	91,1	90,3	91,7	91,0	91,7	91,7	91,5
35	89,6	90,1	89,9	90,9	90,1	91,4	90,8	91,5	90,8	91,1
36	88,3	89,1	89,0	89,8	89,1	90,1	89,9	90,5	90,7	90,3
37	88,5	89,0	88,7	89,4	88,9	90,8	90,3	90,8	91,2	90,8

RESULTADOS CON LOS MODELOS DEL CAMPUS

Medición BR			
Hora	Medida	Volumen	%
17:57:20	0	0,0	0,0
18:00:50	2	14,0	1,0
18:01:40	6	42,1	3,1
18:02:45	10	70,1	5,1
18:04:15	21	147,2	10,8
18:04:50	25	175,3	12,8
18:05:50	29	203,3	14,9
18:07:30	36	252,4	18,5
18:08:35	39	273,4	20,0
18:10:00	44	308,4	22,6
18:11:20	49	343,5	25,2
18:12:50	52	364,5	26,7
18:15:10	55	385,6	28,2
18:16:55	57	399,6	29,3
18:18:00	58	406,6	29,8
18:19:20	60	420,6	30,8
18:20:20	61	427,6	31,3
18:21:30	63	441,6	32,4
18:22:30	63	441,6	32,4
18:23:40	64	448,6	32,9
18:25:20	64	448,6	32,9
18:26:20	65	455,7	33,4
18:27:25	67	469,7	34,4
18:28:50	67	469,7	34,4
18:29:55	68	476,7	34,9
18:31:05	69	483,7	35,4
18:33:00	70	490,7	35,9
18:34:15	70	490,7	35,9
18:35:20	71	497,7	36,5
18:36:30	71	497,7	36,5
18:37:40	72	504,7	37,0
18:38:50	72	504,7	37,0
18:40:15	73	511,7	37,5
18:41:30	73	511,7	37,5
18:42:45	73	511,7	37,5

Hora	Medida	Volumen	%
18:44:10	74	518,7	38,0
18:45:40	74	518,7	38,0
18:46:50	74	518,7	38,0
18:48:15	74	518,7	38,0
18:49:20	75	525,8	38,5
18:50:35	75	525,8	38,5
18:52:00	75	525,8	38,5
18:53:20	76	532,8	39,0
18:54:30	76	532,8	39,0
18:55:45	76	532,8	39,0
18:57:00	76	532,8	39,0
18:58:15	77	539,8	39,5
19:05:30	78	546,8	40,1

Medición PR			
Hora	Medida	Volumen	%
18:03:50	0	0,0	0,0
18:12:55	1	7,1	0,5
18:14:50	2	14,2	1,0
18:16:35	4	28,4	2,1
18:17:35	4	28,4	2,1
18:19:00	5	35,5	2,6
18:19:50	6	42,5	3,1
18:21:10	7	49,6	3,6
18:22:10	7	49,6	3,6
18:23:20	8	56,7	4,2
18:25:00	9	63,8	4,7
18:26:00	10	70,9	5,2
18:27:00	11	78,0	5,7
18:28:30	11	78,0	5,7
18:29:35	12	85,1	6,2
18:30:40	13	92,2	6,8
18:32:15	14	99,3	7,3
18:33:50	14	99,3	7,3
18:35:00	15	106,4	7,8
18:36:10	15	106,4	7,8
18:37:15	16	113,4	8,3
18:38:30	16	113,4	8,3
18:39:55	18	127,6	9,3
18:41:05	19	134,7	9,9
18:42:15	19	134,7	9,9
18:43:30	20	141,8	10,4
18:45:10	20	141,8	10,4
18:46:30	21	148,9	10,9
18:47:55	21	148,9	10,9
18:49:00	22	156,0	11,4
18:50:15	22	156,0	11,4
18:51:35	23	163,1	11,9
18:53:00	23	163,1	11,9
18:54:10	23	163,1	11,9
18:55:25	24	170,2	12,5
18:56:40	24	170,2	12,5
18:57:50	24	170,2	12,5

Hora	Medida	Volumen	%
18:59:00	25	177,3	13,0
19:00:40	25	177,3	13,0
19:01:50	25	177,3	13,0
19:03:10	26	184,3	13,5
19:04:15	26	184,3	13,5
19:09:10	27	191,4	14,0
19:14:15	28	198,5	14,5
19:15:30	28	198,5	14,5

Medición PA			
Hora	Medida	Volumen	%
18:07:00	0	0,0	0,0
18:10:20	1	7,2	0,5
18:11:40	5	35,9	2,6
18:12:30	7	50,2	3,7
18:13:15	10	71,7	5,3
18:14:40	13	93,2	6,8
18:16:25	18	129,1	9,5
18:17:20	20	143,4	10,5
18:18:50	22	157,7	11,6
18:19:45	24	172,1	12,6
18:21:00	26	186,4	13,7
18:22:00	28	200,8	14,7
18:22:50	29	207,9	15,2
18:23:20	30	215,1	15,8
18:24:55	32	229,4	16,8
18:25:50	33	236,6	17,3
18:26:45	34	243,8	17,9
18:28:10	37	265,3	19,4
18:29:25	39	279,6	20,5
18:30:30	39	279,6	20,5
18:32:00	41	294,0	21,5
18:33:35	43	308,3	22,6
18:34:50	44	315,5	23,1
18:35:50	45	322,7	23,6
18:37:00	45	322,7	23,6
18:38:15	47	337,0	24,7
18:39:35	48	344,2	25,2
18:40:55	49	351,3	25,7
18:42:00	50	358,5	26,3
18:43:20	51	365,7	26,8
18:44:25	52	372,8	27,3
18:46:10	53	380,0	27,8
18:47:40	55	394,4	28,9
18:48:50	56	401,5	29,4
18:50:00	57	408,7	29,9
18:51:20	58	415,9	30,5
18:52:45	59	423,0	31,0

Hora	Medida	Volumen	%
18:54:00	60	430,2	31,5
18:55:20	61	437,4	32,0
18:56:20	62	444,5	32,6
18:57:35	62	444,5	32,6
18:58:50	63	451,7	33,1
19:00:20	64	458,9	33,6
19:01:35	65	466,1	34,1
19:02:50	65	466,1	34,1
19:03:55	66	473,2	34,7
19:05:00	67	480,4	35,2
19:06:30	68	487,6	35,7
19:08:51	69	494,7	36,2
19:10:30	70	501,9	36,8
19:12:00	70	501,9	36,8
19:13:45	71	509,1	37,3
19:15:15	72	516,2	37,8
19:17:50	73	523,4	38,3
19:19:30	75	537,8	39,4
19:21:50	76	544,9	39,9
19:23:45	77	552,1	40,4
19:26:40	78	559,3	41,0
19:30:50	79	566,4	41,5

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

Medición BA			
Hora	Medida	Volumen	%
18:14:20	0	0,0	0,0
18:17:00	1	7,6	0,6
18:17:45	4	30,4	2,2
18:18:20	7	53,3	3,9
18:19:25	12	91,3	6,7
18:20:30	17	129,4	9,5
18:21:00	21	159,8	11,7
18:21:40	24	182,6	13,4
18:22:40	27	205,5	15,1
18:23:50	33	251,1	18,4
18:24:50	35	266,4	19,5
18:25:35	37	281,6	20,6
18:26:30	39	296,8	21,7
18:27:25	40	304,4	22,3
18:28:00	42	319,6	23,4
18:29:00	43	327,2	24,0
18:30:10	45	342,5	25,1
18:31:25	46	350,1	25,6
18:33:20	48	365,3	26,8
18:34:25	50	380,5	27,9
18:35:30	51	388,1	28,4
18:36:45	52	395,7	29,0
18:38:00	53	403,3	29,5
18:39:10	54	410,9	30,1
18:40:35	54	410,9	30,1
18:41:50	55	418,6	30,7
18:43:05	56	426,2	31,2
18:43:30	56	426,2	31,2
18:45:55	57	433,8	31,8
18:47:30	58	441,4	32,3
18:48:35	58	441,4	32,3
18:49:50	59	449,0	32,9
18:51:00	59	449,0	32,9
18:52:25	59	449,0	32,9
18:53:40	60	456,6	33,5
18:54:50	60	456,6	33,5
18:56:10	61	464,2	34,0

Hora	Medida	Volumen	%
18:57:20	61	464,2	34,0
18:58:30	61	464,2	34,0
19:00:00	62	471,8	34,6
19:01:10	62	471,8	34,6
19:02:30	62	471,8	34,6
19:03:40	62	471,8	34,6
19:04:40	63	479,4	35,1
19:06:10	63	479,4	35,1
19:08:30	64	487,0	35,7
19:10:10	64	487,0	35,7
19:11:30	64	487,0	35,7
19:13:20	65	494,7	36,2
19:15:00	65	494,7	36,2
19:17:30	65	494,7	36,2
19:19:00	66	502,3	36,8
19:20:35	66	502,3	36,8

RESULTADOS CON LOS MODELOS DE GIJÓN

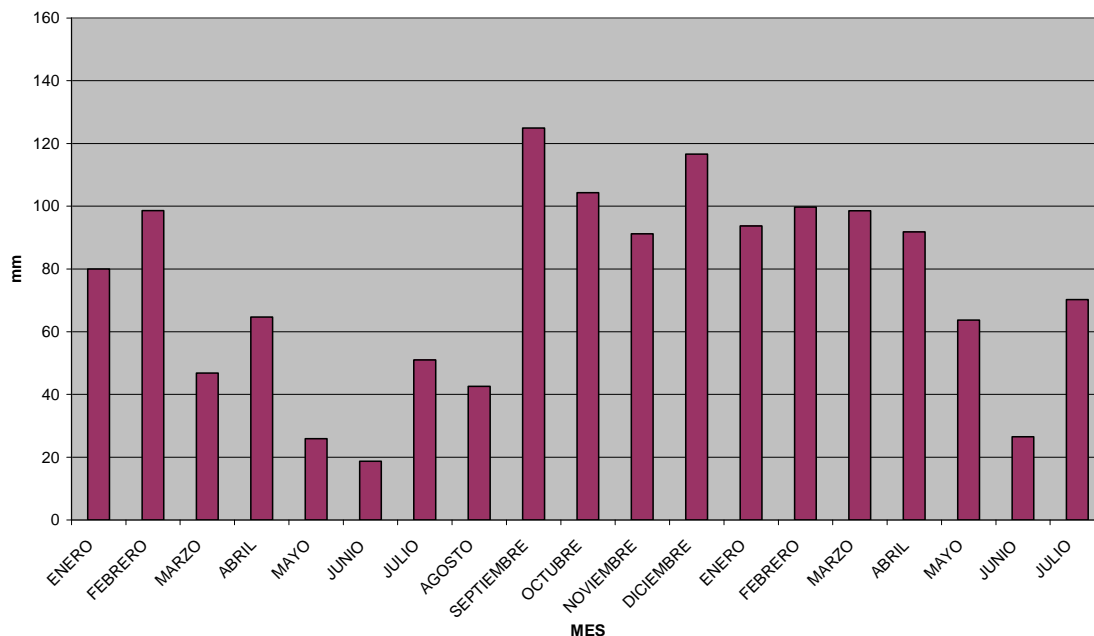
En esta parte del anexo se presentan los resultados obtenidos con las plazas de aparcamiento experimentales construidas en el aparcamiento de la Guía en Gijón. Primeramente se presentan los datos correspondientes a las lluvias naturales y posteriormente los obtenidos con las aportaciones de agua artificiales. Las plazas estudiadas fueron:

- Plaza 6: sección tipo BR (Bloques y reciclado).
- Plaza 8: sección tipo BA (Bloques y árido calizo).
- Plaza 12: sección tipo PA (Mezcla porosa y árido calizo).
- Plaza 14: sección tipo PR (Mezcla porosa y reciclado).

Primero se presentan los resultados de las lluvias naturales monitorizadas presentando un resumen de la información disponible sobre el afluente y a continuación las tablas de las series medidas en cada plaza de aparcamiento.

La información referente a las precipitaciones registradas en Gijón (afluente) ha sido elaborada a partir de los datos horarios facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología, antiguo Instituto Nacional de Meteorología, del Ministerio de Medio Ambiente con la autorización para reproducirla 390050781, estando prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio a partir de esta tesis.

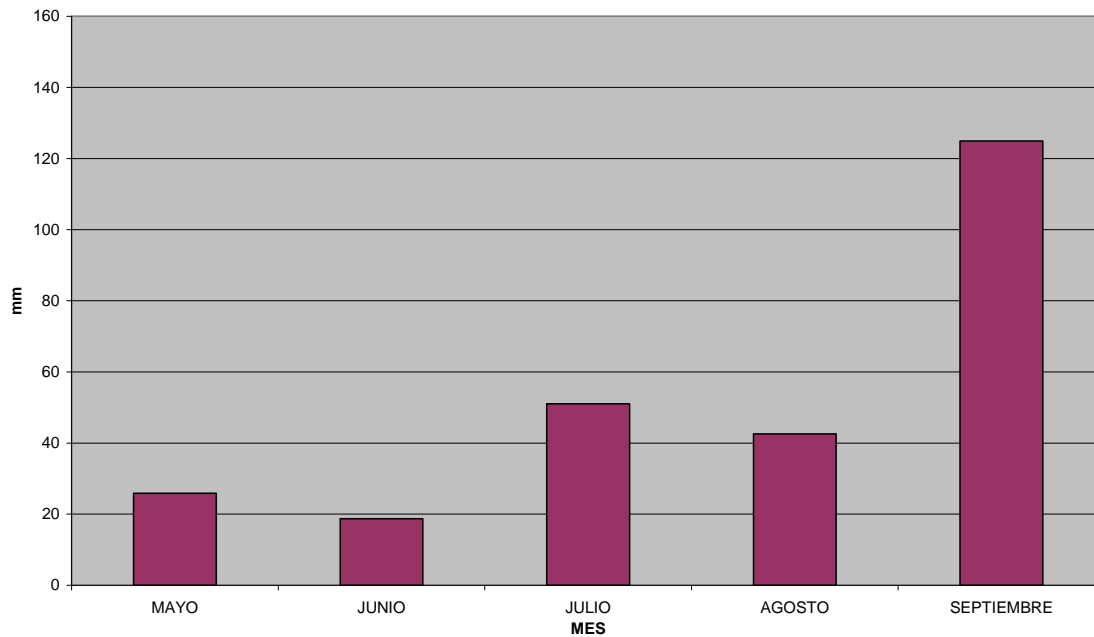
Precipitación mensual total en GIJÓN desde enero de 2006 y hasta julio de 2007



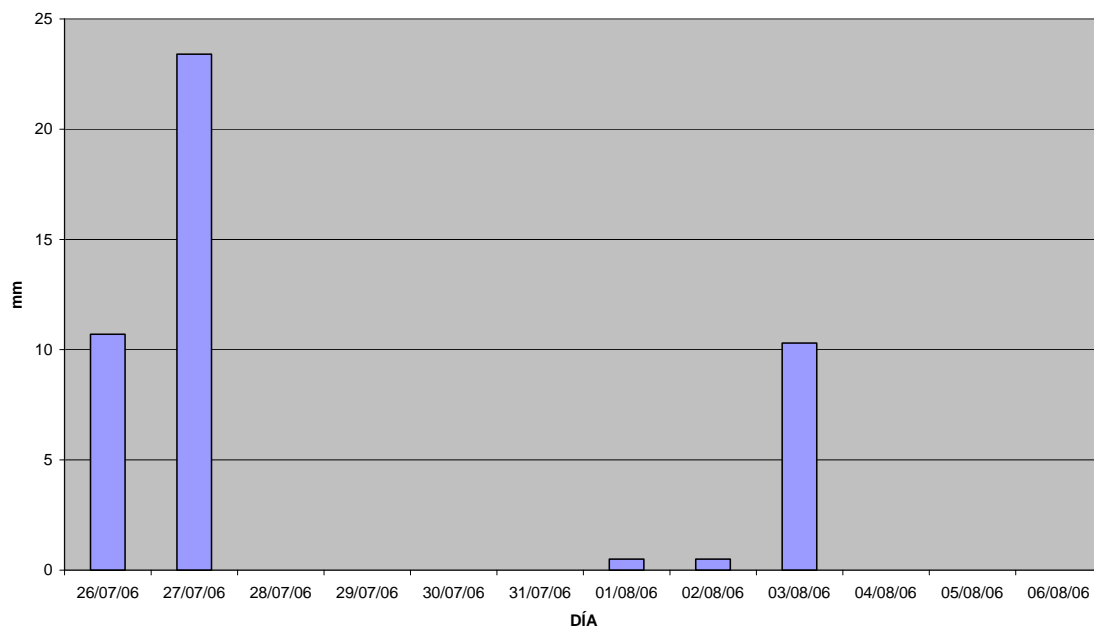
Lluvias naturales:

Afluente o aportación natural de agua en la plaza 6 (sección tipo BR) del 4 al 12 de agosto de 2006: serie 1 del 5 de agosto de 2006.

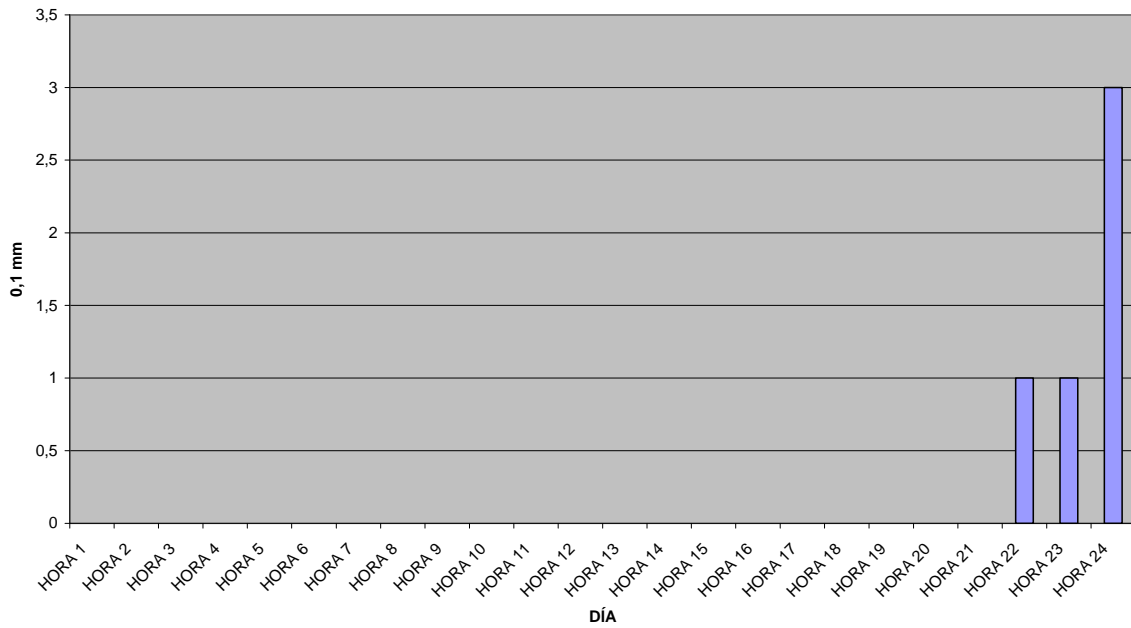
Precipitación mensual total en GIJÓN desde mayo de 2006 y hasta septiembre de 2006



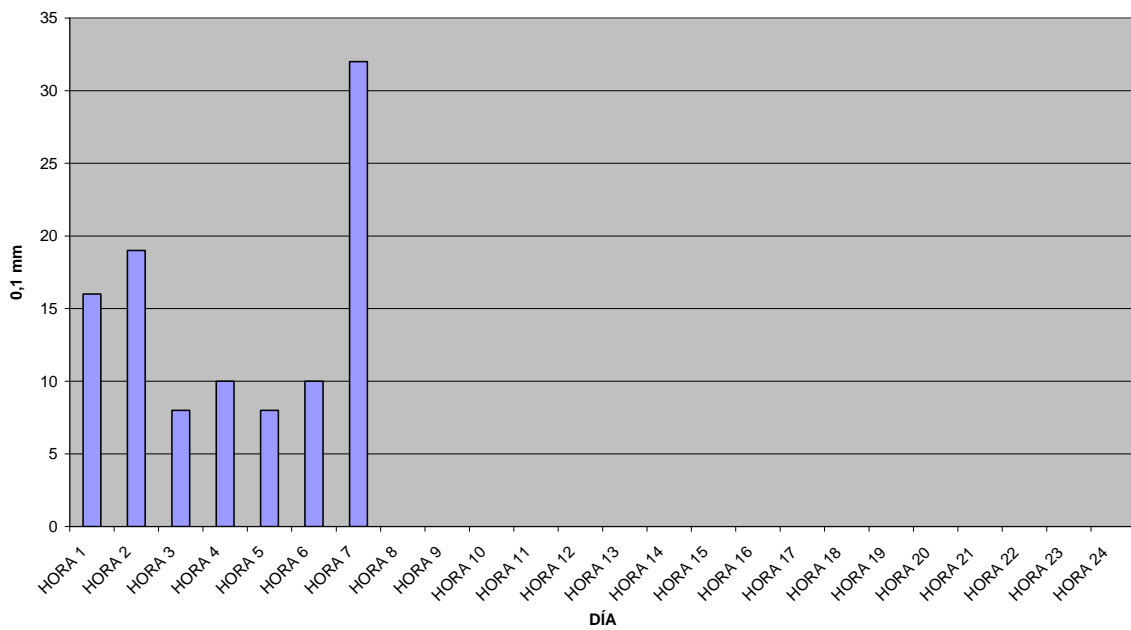
PRECIPITACIÓN DIARIA



PRECIPITACIÓN DIARIA (02/08/06)



PRECIPITACIÓN DIARIA (03/08/06)



Lluvias naturales:

Efluente plaza 6 (sección tipo BR) serie 1: 5 de agosto de 2006.

Efluente BR, serie 1		
Hora	Medida	Volumen
16:30	0	0
16:35	1	7,2
16:40	1	7,2
16:45	2	14,4
16:50	3	21,6
16:55	3	21,6
17:00	4	28,8
17:05	6	43,2
17:10	7	50,4
17:15	7	50,4
17:20	8	57,6
17:25	9	64,8
17:30	10	72,0
17:35	12	86,4
17:40	13	93,6
17:45	14	100,8
17:50	15	108,0
17:55	16	115,2
18:00	18	129,6
18:05	19	136,8
18:10	20	144,0
18:15	21	151,2
18:20	22	158,4
18:25	23	165,6
18:30	26	187,2
18:35	27	194,4
18:40	28	201,6
18:45	30	216,0
18:50	31	223,2
18:55	32	230,4
19:00	34	244,8
19:05	35	252,0
19:10	36	259,2
19:15	37	266,4

Hora	Medida	Volumen
19:20	39	280,8
19:25	40	288,0
19:30	41	295,2
19:35	42	302,4
19:40	43	309,6
19:45	45	324,0
19:50	47	338,4
19:55	48	345,6
20:00	49	352,8
20:05	50	360,0
20:10	51	367,2
20:15	52	374,4
20:20	54	388,8
20:25	55	396,0
20:30	56	403,2
20:35	57	410,4
20:40	58	417,6
20:45	59	424,8
20:50	60	432,0
20:55	61	439,2
21:00	62	446,4
21:05	64	460,8
21:10	65	468,0
21:15	66	475,2
21:20	67	482,4
21:25	68	489,6
21:30	69	496,8
21:35	70	504,0
21:40	71	511,2
21:45	72	518,4
21:50	73	525,6
21:55	73	525,6
22:00	74	532,8
22:05	75	540,0

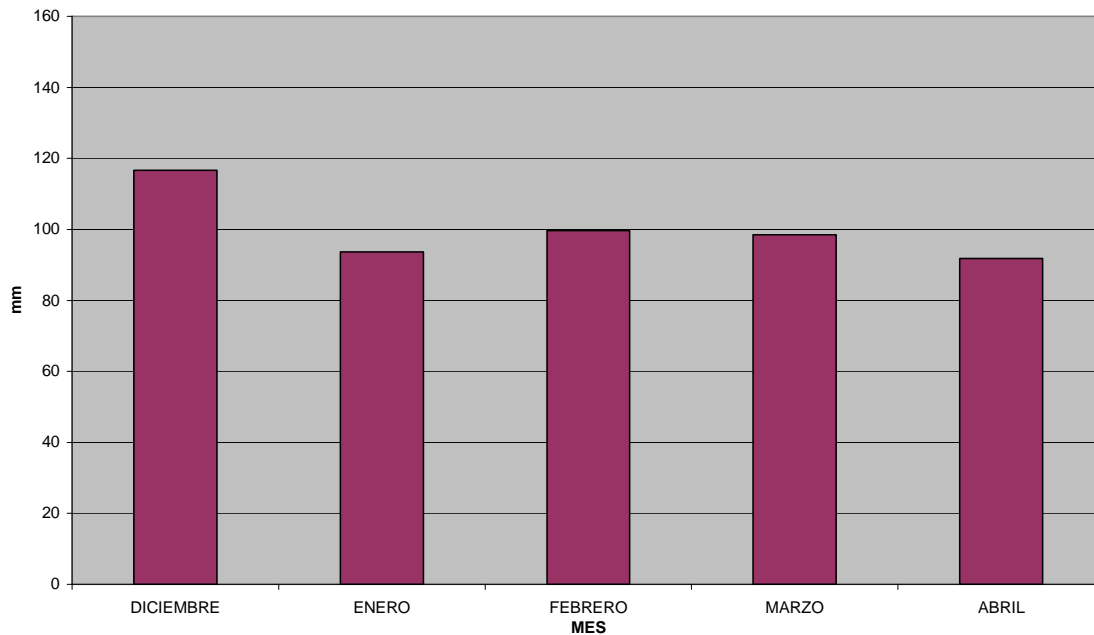
Hora	Medida	Volumen
22:10	76	547,2
22:15	77	554,4
22:20	77	554,4
22:25	78	561,6
22:30	79	568,8
22:35	79	568,8
22:40	80	576,0
22:45	81	583,2
22:50	81	583,2
22:55	82	590,4
23:00	82	590,4
23:05	84	604,8
23:10	84	604,8
23:15	85	612,0
23:20	85	612,0
23:25	86	619,2
23:30	86	619,2
23:35	87	626,4
23:40	87	626,4
23:45	87	626,4
23:50	88	633,6
23:55	88	633,6
0:00	88	633,6
0:05	89	640,8
0:10	89	640,8
0:15	89	640,8
0:20	89	640,8
0:25	89	640,8
0:30	90	648,0

Lluvias naturales:

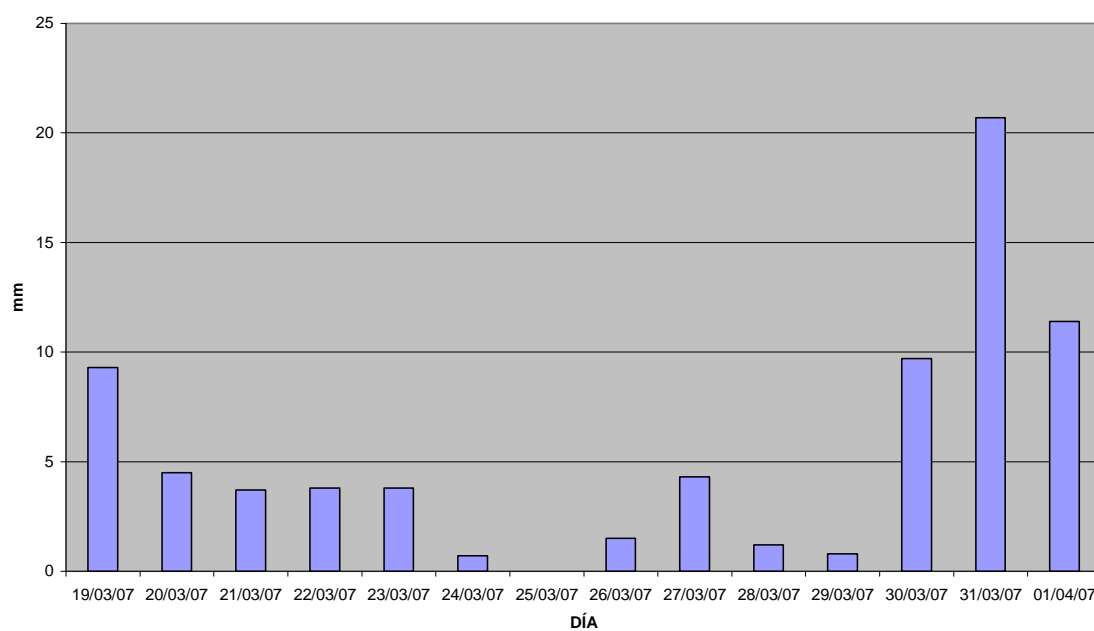
Plaza 8 (sección tipo BA) del 29 de marzo al 16 de mayo de 2007.

Afluente: serie 1 del 29 al 31 de marzo.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde diciembre de 2006 y hasta abril de 2007



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 8 (sección tipo BA): del 29 de marzo al 16 de mayo de 2007.

Efluente: serie 1 del 29 al 31 de marzo.

Efluente BA, serie 1		
Hora	Medida	Volumen
10:55:00	0	0
11:00:00	10	72,0
11:05:00	19	136,8
11:10:00	28	201,6
11:15:00	36	259,2
11:20:00	45	324,0
11:25:00	52	374,4
11:30:00	62	446,4
11:35:00	69	496,8
11:40:00	78	561,6
11:45:00	87	626,4
11:50:00	97	698,4
11:55:00	103	741,6
12:00:00	113	813,6
12:05:00	123	885,6
12:10:00	129	928,8
12:15:00	139	1000,8
12:20:00	148	1065,6
12:25:00	157	1130,4
12:30:00	164	1180,8
12:35:00	174	1252,8
12:40:00	182	1310,4
12:45:00	191	1375,2
12:50:00	200	1440,0
12:55:00	208	1497,6
13:00:00	217	1562,4
13:05:00	225	1620,0
13:10:00	234	1684,8
13:15:00	243	1749,6
13:20:00	251	1807,2
13:25:00	259	1864,8
13:30:00	269	1936,8
13:35:00	278	2001,6
13:40:00	285	2052,0
13:45:00	295	2124,0

Hora	Medida	Volumen
13:50:00	305	2196,0
13:55:00	311	2239,2
14:00:00	321	2311,2
14:05:00	330	2376,0
14:10:00	339	2440,8
14:15:00	347	2498,4
14:20:00	357	2570,4
14:25:00	365	2628,0
14:30:00	373	2685,6
14:35:00	384	2764,8
14:40:00	393	2829,6
14:45:00	402	2894,4
14:50:00	411	2959,2
14:55:00	419	3016,8
15:00:00	430	3096,0
15:05:00	438	3153,6
15:10:00	446	3211,2
15:15:00	457	3290,4
15:20:00	467	3362,4
15:25:00	474	3412,8
15:30:00	485	3492,0
15:35:00	494	3556,8
15:40:00	501	3607,2
15:45:00	512	3686,4
15:50:00	523	3765,6
15:55:00	531	3823,2
16:00:00	541	3895,2
16:05:00	551	3967,2
16:10:00	560	4032,0
16:15:00	568	4089,6
16:20:00	579	4168,8
16:25:00	588	4233,6
16:30:00	599	4312,8
16:35:00	607	4370,4
16:40:00	617	4442,4
16:45:00	627	4514,4
16:50:00	637	4586,4

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

Hora	Medida	Volumen
16:55:00	645	4644,0
17:00:00	656	4723,2
17:05:00	667	4802,4
17:10:00	674	4852,8
17:15:00	686	4939,2
17:20:00	696	5011,2
17:25:00	704	5068,8
17:30:00	714	5140,8
17:35:00	725	5220,0
17:40:00	734	5284,8
17:45:00	744	5356,8
17:50:00	754	5428,8
17:55:00	764	5500,8
18:00:00	773	5565,6
18:05:00	784	5644,8
18:10:00	794	5716,8
18:15:00	804	5788,8
18:20:00	814	5860,8
18:25:00	823	5925,6
18:30:00	834	6004,8
18:35:00	843	6069,6
18:40:00	852	6134,4
18:45:00	863	6213,6
18:50:00	874	6292,8
18:55:00	881	6343,2
19:00:00	893	6429,6
19:05:00	904	6508,8
19:10:00	913	6573,6
19:15:00	923	6645,6
19:20:00	933	6717,6
19:25:00	943	6789,6
19:30:00	951	6847,2
19:35:00	963	6933,6
19:40:00	972	6998,4
19:45:00	983	7077,6
19:50:00	992	7142,4
19:55:00	1001	7207,2
20:00:00	1013	7293,6
20:05:00	1021	7351,2
20:10:00	1030	7416,0

Hora	Medida	Volumen
20:15:00	1041	7495,2
20:20:00	1052	7574,4
20:25:00	1060	7632,0
20:30:00	1071	7711,2
20:35:00	1081	7783,2
20:40:00	1089	7840,8
20:45:00	1099	7912,8
20:50:00	1110	7992,0
20:55:00	1119	8056,8
21:00:00	1129	8128,8
21:05:00	1138	8193,6
21:10:00	1148	8265,6
21:15:00	1156	8323,2
21:20:00	1168	8409,6
21:25:00	1177	8474,4
21:30:00	1187	8546,4
21:35:00	1197	8618,4
21:40:00	1205	8676,0
21:45:00	1216	8755,2
21:50:00	1224	8812,8
21:55:00	1234	8884,8
22:00:00	1243	8949,6
22:05:00	1254	9028,8
22:10:00	1261	9079,2
22:15:00	1272	9158,4
22:20:00	1281	9223,2
22:25:00	1289	9280,8
22:30:00	1299	9352,8
22:35:00	1309	9424,8
22:40:00	1317	9482,4
22:45:00	1327	9554,4
22:50:00	1336	9619,2
22:55:00	1345	9684,0
23:00:00	1353	9741,6
23:05:00	1364	9820,8
23:10:00	1372	9878,4
23:15:00	1382	9950,4
23:20:00	1390	10008,0
23:25:00	1399	10072,8
23:30:00	1408	10137,6

Hora	Medida	Volumen
------	--------	---------

23:35:00	1417	10202,4
23:40:00	1425	10260,0
23:45:00	1435	10332,0
23:50:00	1444	10396,8
23:55:00	1450	10440,0
0:00:00	1461	10519,2
0:05:00	1469	10576,8
0:10:00	1477	10634,4
0:15:00	1486	10699,2
0:20:00	1496	10771,2
0:25:00	1503	10821,6
0:30:00	1512	10886,4
0:35:00	1520	10944,0
0:40:00	1529	11008,8
0:45:00	1536	11059,2
0:50:00	1546	11131,2
0:55:00	1554	11188,8
1:00:00	1563	11253,6
1:05:00	1570	11304,0
1:10:00	1577	11354,4
1:15:00	1587	11426,4
1:20:00	1594	11476,8
1:25:00	1602	11534,4
1:30:00	1610	11592,0
1:35:00	1620	11664,0
1:40:00	1626	11707,2
1:45:00	1634	11764,8
1:50:00	1643	11829,6
1:55:00	1649	11872,8
2:00:00	1658	11937,6
2:05:00	1666	11995,2
2:10:00	1673	12045,6
2:15:00	1681	12103,2
2:20:00	1689	12160,8
2:25:00	1696	12211,2
2:30:00	1703	12261,6
2:35:00	1712	12326,4
2:40:00	1719	12376,8
2:45:00	1726	12427,2
2:50:00	1734	12484,8

Hora	Medida	Volumen
2:55:00	1740	12528,0

3:00:00	1749	12592,8
3:05:00	1756	12643,2
3:10:00	1762	12686,4
3:15:00	1770	12744,0
3:20:00	1778	12801,6
3:25:00	1783	12837,6
3:30:00	1792	12902,4
3:35:00	1799	12952,8
3:40:00	1807	13010,4
3:45:00	1813	13053,6
3:50:00	1820	13104,0
3:55:00	1827	13154,4
4:00:00	1833	13197,6
4:05:00	1842	13262,4
4:10:00	1848	13305,6
4:15:00	1855	13356,0
4:20:00	1862	13406,4
4:25:00	1868	13449,6
4:30:00	1875	13500,0
4:35:00	1882	13550,4
4:40:00	1888	13593,6
4:45:00	1895	13644,0
4:50:00	1903	13701,6
4:55:00	1907	13730,4
5:00:00	1914	13780,8
5:05:00	1922	13838,4
5:10:00	1927	13874,4
5:15:00	1933	13917,6
5:20:00	1941	13975,2
5:25:00	1947	14018,4
5:30:00	1952	14054,4
5:35:00	1960	14112,0
5:40:00	1966	14155,2
5:45:00	1971	14191,2
5:50:00	1979	14248,8
5:55:00	1984	14284,8
6:00:00	1990	14328,0
6:05:00	1997	14378,4
6:10:00	2002	14414,4

Hora	Medida	Volumen
6:15:00	2009	14464,8
6:20:00	2015	14508,0

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

6:25:00	2021	14551,2
6:30:00	2027	14594,4
6:35:00	2034	14644,8
6:40:00	2039	14680,8
6:45:00	2045	14724,0
6:50:00	2052	14774,4
6:55:00	2057	14810,4
7:00:00	2063	14853,6
7:05:00	2070	14904,0
7:10:00	2075	14940,0
7:15:00	2080	14976,0
7:20:00	2088	15033,6
7:25:00	2093	15069,6
7:30:00	2098	15105,6
7:35:00	2104	15148,8
7:40:00	2110	15192,0
7:45:00	2116	15235,2
7:50:00	2121	15271,2
7:55:00	2127	15314,4
8:00:00	2133	15357,6
8:05:00	2138	15393,6
8:10:00	2144	15436,8
8:15:00	2150	15480,0
8:20:00	2155	15516,0
8:25:00	2160	15552,0
8:30:00	2166	15595,2
8:35:00	2172	15638,4
8:40:00	2176	15667,2
8:45:00	2182	15710,4
8:50:00	2188	15753,6
8:55:00	2193	15789,6
9:00:00	2198	15825,6
9:05:00	2204	15868,8
9:10:00	2209	15904,8
9:15:00	2213	15933,6
9:20:00	2220	15984,0
9:25:00	2224	16012,8
9:30:00	2230	16056,0

Hora	Medida	Volumen
9:35:00	2234	16084,8
9:40:00	2240	16128,0
9:45:00	2245	16164,0

9:50:00	2249	16192,8
9:55:00	2254	16228,8
10:00:00	2260	16272,0
10:05:00	2265	16308,0
10:10:00	2269	16336,8
10:15:00	2274	16372,8
10:20:00	2280	16416,0
10:25:00	2284	16444,8
10:30:00	2289	16480,8
10:35:00	2295	16524,0
10:40:00	2299	16552,8
10:45:00	2304	16588,8
10:50:00	2309	16624,8
10:55:00	2314	16660,8
11:00:00	2318	16689,6
11:05:00	2323	16725,6
11:10:00	2327	16754,4
11:15:00	2333	16797,6
11:20:00	2337	16826,4
11:25:00	2342	16862,4
11:30:00	2346	16891,2
11:35:00	2352	16934,4
11:40:00	2356	16963,2
11:45:00	2361	16999,2
11:50:00	2366	17035,2
11:55:00	2369	17056,8
12:00:00	2375	17100,0
12:05:00	2380	17136,0
12:10:00	2384	17164,8
12:15:00	2388	17193,6
12:20:00	2394	17236,8
12:25:00	2398	17265,6
12:30:00	2402	17294,4
12:35:00	2407	17330,4
12:40:00	2412	17366,4
12:45:00	2416	17395,2
12:50:00	2420	17424,0

Hora	Medida	Volumen
12:55:00	2424	17452,8
13:00:00	2430	17496,0
13:05:00	2434	17524,8
13:10:00	2438	17553,6

13:15:00	2443	17589,6
13:20:00	2448	17625,6
13:25:00	2452	17654,4
13:30:00	2456	17683,2
13:35:00	2460	17712,0
13:40:00	2464	17740,8
13:45:00	2469	17776,8
13:50:00	2474	17812,8
13:55:00	2478	17841,6
14:00:00	2482	17870,4
14:05:00	2487	17906,4
14:10:00	2492	17942,4
14:15:00	2495	17964,0
14:20:00	2499	17992,8
14:25:00	2504	18028,8
14:30:00	2509	18064,8
14:35:00	2513	18093,6
14:40:00	2517	18122,4
14:45:00	2521	18151,2
14:50:00	2526	18187,2
14:55:00	2530	18216,0
15:00:00	2534	18244,8
15:05:00	2538	18273,6
15:10:00	2542	18302,4
15:15:00	2547	18338,4
15:20:00	2551	18367,2
15:25:00	2555	18396,0
15:30:00	2559	18424,8
15:35:00	2564	18460,8
15:40:00	2569	18496,8
15:45:00	2572	18518,4
15:50:00	2576	18547,2
15:55:00	2580	18576,0
16:00:00	2585	18612,0
16:05:00	2589	18640,8
16:10:00	2593	18669,6

16:40:00	2618	18849,6
16:45:00	2623	18885,6
16:50:00	2627	18914,4
16:55:00	2631	18943,2
17:00:00	2634	18964,8
17:05:00	2640	19008,0
17:10:00	2643	19029,6
17:15:00	2647	19058,4
17:20:00	2651	19087,2
17:25:00	2656	19123,2
17:30:00	2660	19152,0
17:35:00	2664	19180,8
17:40:00	2669	19216,8
17:45:00	2672	19238,4
17:50:00	2676	19267,2
17:55:00	2682	19310,4
18:00:00	2686	19339,2
18:05:00	2689	19360,8
18:10:00	2694	19396,8
18:15:00	2699	19432,8
18:20:00	2703	19461,6
18:25:00	2707	19490,4
18:30:00	2711	19519,2
18:35:00	2717	19562,4
18:40:00	2721	19591,2
18:45:00	2725	19620,0
18:50:00	2730	19656,0
18:55:00	2734	19684,8
19:00:00	2739	19720,8
19:05:00	2744	19756,8
19:10:00	2749	19792,8
19:15:00	2753	19821,6
19:20:00	2759	19864,8
19:25:00	2764	19900,8
19:30:00	2768	19929,6

Hora	Medida	Volumen
16:15:00	2597	18698,4
16:20:00	2602	18734,4
16:25:00	2606	18763,2
16:30:00	2610	18792,0
16:35:00	2614	18820,8

Hora	Medida	Volumen
19:35:00	2774	19972,8
19:40:00	2780	20016,0
19:45:00	2785	20052,0
19:50:00	2790	20088,0
19:55:00	2798	20145,6
20:00:00	2805	20196,0

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

20:05:00	2812	20246,4
20:10:00	2821	20311,2
20:15:00	2828	20361,6
20:20:00	2838	20433,6
20:25:00	2846	20491,2
20:30:00	2856	20563,2
20:35:00	2868	20649,6
20:40:00	2878	20721,6
20:45:00	2889	20800,8
20:50:00	2901	20887,2
20:55:00	2914	20980,8
21:00:00	2924	21052,8
21:05:00	2937	21146,4
21:10:00	2951	21247,2
21:15:00	2963	21333,6
21:20:00	2975	21420,0
21:25:00	2989	21520,8
21:30:00	3001	21607,2
21:35:00	3014	21700,8
21:40:00	3028	21801,6
21:45:00	3040	21888,0
21:50:00	3054	21988,8
21:55:00	3067	22082,4
22:00:00	3079	22168,8
22:05:00	3094	22276,8
22:10:00	3107	22370,4
22:15:00	3120	22464,0
22:20:00	3135	22572,0
22:25:00	3149	22672,8
22:30:00	3160	22752,0
22:35:00	3175	22860,0
22:40:00	3190	22968,0
22:45:00	3201	23047,2
22:50:00	3217	23162,4

Hora	Medida	Volumen
22:55:00	3234	23284,8
23:00:00	3248	23385,6
23:05:00	3262	23486,4
23:10:00	3280	23616,0
23:15:00	3302	23774,4
23:20:00	3341	24055,2
23:25:00	3405	24516,0

23:30:00	3469	24976,8
23:35:00	3553	25581,6
23:40:00	3657	26330,4
23:45:00	3795	27324,0
23:50:00	3957	28490,4
23:55:00	4092	29462,4
0:00:00	4257	30650,4
0:05:00	4489	32320,8
0:10:00	4727	34034,4
0:15:00	4887	35186,4
0:20:00	5101	36727,2
0:25:00	5314	38260,8
0:30:00	5473	39405,6
0:35:00	5708	41097,6
0:40:00	5953	42861,6
0:45:00	6159	44344,8
0:50:00	6356	45763,2
0:55:00	6574	47332,8
1:00:00	6749	48592,8
1:05:00	6914	49780,8
1:10:00	7089	51040,8
1:15:00	7230	52056,0
1:20:00	7385	53172,0
1:25:00	7508	54057,6
1:30:00	7624	54892,8
1:35:00	7751	55807,2
1:40:00	7855	56556,0
1:45:00	7955	57276,0
1:50:00	8062	58046,4
1:55:00	8164	58780,8
2:00:00	8232	59270,4
2:05:00	8326	59947,2
2:10:00	8414	60580,8

Hora	Medida	Volumen
2:15:00	8476	61027,2
2:20:00	8559	61624,8
2:25:00	8640	62208,0
2:30:00	8707	62690,4
2:35:00	8770	63144,0
2:40:00	8844	63676,8
2:45:00	8904	64108,8
2:50:00	8963	64533,6

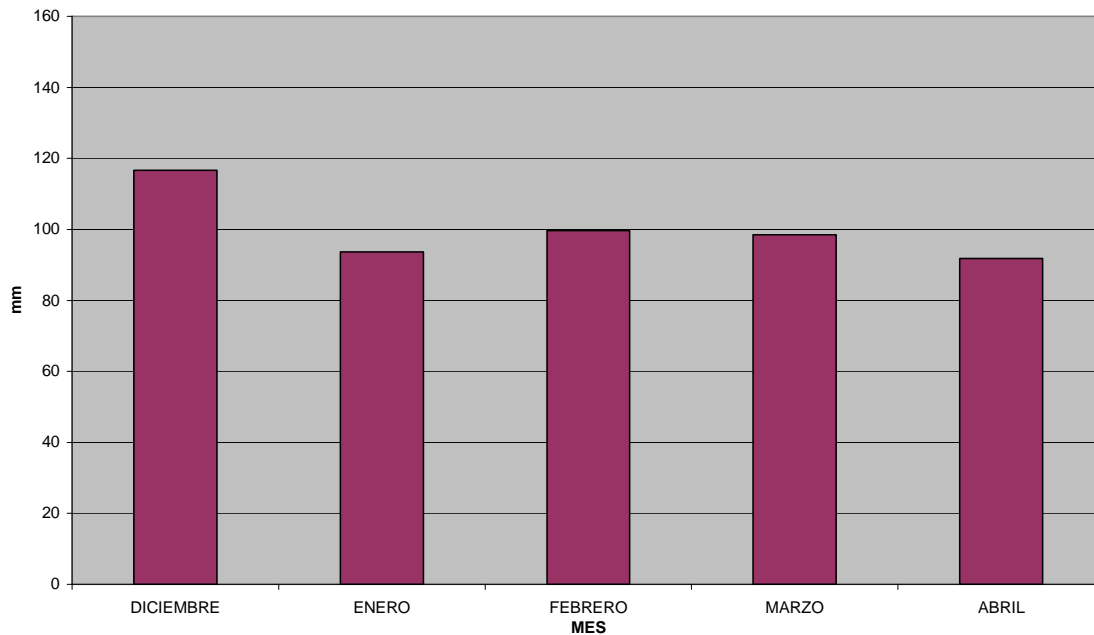
2:55:00	9029	65008,8
3:00:00	9084	65404,8
3:05:00	9146	65851,2
3:10:00	9197	66218,4
3:15:00	9248	66585,6
3:20:00	9306	67003,2
3:25:00	9354	67348,8
3:30:00	9400	67680,0
3:35:00	9453	68061,6
3:40:00	9504	68428,8
3:45:00	9540	68688,0
3:50:00	9588	69033,6
3:55:00	9636	69379,2
4:00:00	9670	69624,0
4:05:00	9716	69955,2
4:10:00	9761	70279,2
4:15:00	9800	70560,0
4:20:00	9836	70819,2
4:25:00	9879	71128,8
4:30:00	9916	71395,2
4:35:00	9951	71647,2
4:40:00	9991	71935,2
4:45:00	9992	71942,4
4:50:00	9992	71942,4

Lluvias naturales:

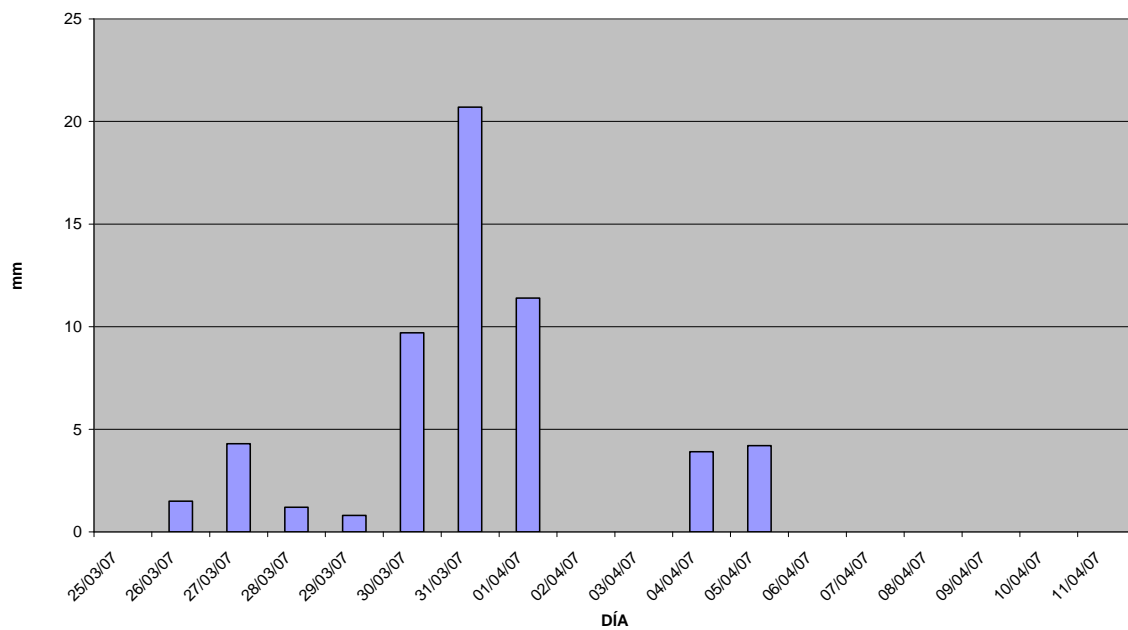
Plaza 8 (sección tipo BA): del 29 de marzo al 16 de mayo de 2007.

Afluente: serie 2 del 4 al 10 de abril.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde diciembre de 2006 y hasta abril de 2007



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 8 (sección tipo BA): del 29 de marzo al 16 de mayo de 2007.

Efluente: serie 2 del 4 al 10 de abril.

Efluente BA, serie 2		
Hora	Medida	Volumen
18:15:00	0	0
18:20:00	15	108,0
18:25:00	29	208,8
18:30:00	40	288,0
18:35:00	52	374,4
18:40:00	65	468,0
18:45:00	76	547,2
18:50:00	88	633,6
18:55:00	102	734,4
19:00:00	112	806,4
19:05:00	126	907,2
19:10:00	138	993,6
19:15:00	148	1065,6
19:20:00	161	1159,2
19:25:00	173	1245,6
19:30:00	183	1317,6
19:35:00	196	1411,2
19:40:00	209	1504,8
19:45:00	218	1569,6
19:50:00	230	1656,0
19:55:00	243	1749,6
20:00:00	253	1821,6
20:05:00	264	1900,8
20:10:00	275	1980,0
20:15:00	286	2059,2
20:20:00	297	2138,4
20:25:00	308	2217,6
20:30:00	319	2296,8
20:35:00	328	2361,6
20:40:00	340	2448,0
20:45:00	350	2520,0
20:50:00	361	2599,2
20:55:00	371	2671,2
21:00:00	381	2743,2
21:05:00	392	2822,4

Hora	Medida	Volumen
21:10:00	401	2887,2
21:15:00	412	2966,4
21:20:00	423	3045,6
21:25:00	433	3117,6
21:30:00	442	3182,4
21:35:00	452	3254,4
21:40:00	463	3333,6
21:45:00	472	3398,4
21:50:00	482	3470,4
21:55:00	492	3542,4
22:00:00	501	3607,2
22:05:00	510	3672,0
22:10:00	521	3751,2
22:15:00	529	3808,8
22:20:00	540	3888,0
22:25:00	548	3945,6
22:30:00	558	4017,6
22:35:00	568	4089,6
22:40:00	576	4147,2
22:45:00	586	4219,2
22:50:00	595	4284,0
22:55:00	605	4356,0
23:00:00	612	4406,4
23:05:00	621	4471,2
23:10:00	631	4543,2
23:15:00	637	4586,4
23:20:00	647	4658,4
23:25:00	656	4723,2
23:30:00	664	4780,8
23:35:00	672	4838,4
23:40:00	682	4910,4
23:45:00	690	4968,0
23:50:00	698	5025,6
23:55:00	707	5090,4
0:00:00	714	5140,8
0:05:00	724	5212,8
0:10:00	731	5263,2

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

Hora	Medida	Volumen
0:15:00	739	5320,8
0:20:00	747	5378,4
0:25:00	755	5436,0
0:30:00	762	5486,4
0:35:00	770	5544,0
0:40:00	779	5608,8
0:45:00	785	5652,0
0:50:00	794	5716,8
0:55:00	802	5774,4
1:00:00	807	5810,4
1:05:00	816	5875,2
1:10:00	824	5932,8
1:15:00	831	5983,2
1:20:00	838	6033,6
1:25:00	846	6091,2
1:30:00	852	6134,4
1:35:00	859	6184,8
1:40:00	867	6242,4
1:45:00	874	6292,8
1:50:00	881	6343,2
1:55:00	889	6400,8
2:00:00	895	6444,0
2:05:00	903	6501,6
2:10:00	909	6544,8
2:15:00	915	6588,0
2:20:00	923	6645,6
2:25:00	930	6696,0
2:30:00	935	6732,0
2:35:00	943	6789,6
2:40:00	951	6847,2
2:45:00	955	6876,0
2:50:00	963	6933,6
2:55:00	970	6984,0
3:00:00	977	7034,4
3:05:00	983	7077,6
3:10:00	990	7128,0
3:15:00	996	7171,2
3:20:00	1002	7214,4
3:25:00	1009	7264,8
3:30:00	1015	7308,0

Hora	Medida	Volumen
3:35:00	1022	7358,4
3:40:00	1027	7394,4
3:45:00	1034	7444,8
3:50:00	1040	7488,0
3:55:00	1046	7531,2
4:00:00	1052	7574,4
4:05:00	1059	7624,8
4:10:00	1065	7668,0
4:15:00	1069	7696,8
4:20:00	1077	7754,4
4:25:00	1083	7797,6
4:30:00	1090	7848,0
4:35:00	1095	7884,0
4:40:00	1101	7927,2
4:45:00	1106	7963,2
4:50:00	1112	8006,4
4:55:00	1118	8049,6
5:00:00	1123	8085,6
5:05:00	1130	8136,0
5:10:00	1135	8172,0
5:15:00	1140	8208,0
5:20:00	1147	8258,4
5:25:00	1152	8294,4
5:30:00	1157	8330,4
5:35:00	1162	8366,4
5:40:00	1168	8409,6
5:45:00	1173	8445,6
5:50:00	1179	8488,8
5:55:00	1185	8532,0
6:00:00	1189	8560,8
6:05:00	1195	8604,0
6:10:00	1200	8640,0
6:15:00	1206	8683,2
6:20:00	1210	8712,0
6:25:00	1216	8755,2
6:30:00	1220	8784,0
6:35:00	1226	8827,2
6:40:00	1231	8863,2
6:45:00	1236	8899,2
6:50:00	1242	8942,4

Hora	Medida	Volumen
------	--------	---------

6:55:00	1246	8971,2
7:00:00	1251	9007,2
7:05:00	1256	9043,2
7:10:00	1261	9079,2
7:15:00	1265	9108,0
7:20:00	1270	9144,0
7:25:00	1276	9187,2
7:30:00	1280	9216,0
7:35:00	1285	9252,0
7:40:00	1290	9288,0
7:45:00	1293	9309,6
7:50:00	1299	9352,8
7:55:00	1303	9381,6
8:00:00	1307	9410,4
8:05:00	1311	9439,2
8:10:00	1315	9468,0
8:15:00	1320	9504,0
8:20:00	1324	9532,8
8:25:00	1328	9561,6
8:30:00	1332	9590,4
8:35:00	1338	9633,6
8:40:00	1342	9662,4
8:45:00	1346	9691,2
8:50:00	1350	9720,0
8:55:00	1354	9748,8
9:00:00	1359	9784,8
9:05:00	1363	9813,6
9:10:00	1368	9849,6
9:15:00	1371	9871,2
9:20:00	1376	9907,2
9:25:00	1381	9943,2
9:30:00	1384	9964,8
9:35:00	1388	9993,6
9:40:00	1392	10022,4
9:45:00	1397	10058,4
9:50:00	1400	10080,0
9:55:00	1404	10108,8
10:00:00	1408	10137,6
10:05:00	1411	10159,2
10:10:00	1416	10195,2

Hora	Medida	Volumen
10:15:00	1420	10224,0

10:20:00	1423	10245,6
10:25:00	1426	10267,2
10:30:00	1430	10296,0
10:35:00	1435	10332,0
10:40:00	1438	10353,6
10:45:00	1442	10382,4
10:50:00	1445	10404,0
10:55:00	1449	10432,8
11:00:00	1454	10468,8
11:05:00	1457	10490,4
11:10:00	1461	10519,2
11:15:00	1464	10540,8
11:20:00	1468	10569,6
11:25:00	1473	10605,6
11:30:00	1477	10634,4
11:35:00	1479	10648,8
11:40:00	1483	10677,6
11:45:00	1487	10706,4
11:50:00	1491	10735,2
11:55:00	1495	10764,0
12:00:00	1499	10792,8
12:05:00	1502	10814,4
12:10:00	1505	10836,0
12:15:00	1510	10872,0
12:20:00	1513	10893,6
12:25:00	1516	10915,2
12:30:00	1520	10944,0
12:35:00	1523	10965,6
12:40:00	1528	11001,6
12:45:00	1531	11023,2
12:50:00	1534	11044,8
12:55:00	1538	11073,6
13:00:00	1541	11095,2
13:05:00	1544	11116,8
13:10:00	1549	11152,8
13:15:00	1553	11181,6
13:20:00	1555	11196,0
13:25:00	1559	11224,8
13:30:00	1563	11253,6

Hora	Medida	Volumen
13:35:00	1567	11282,4
13:40:00	1570	11304,0

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

13:45:00	1573	11325,6
13:50:00	1576	11347,2
13:55:00	1579	11368,8
14:00:00	1583	11397,6
14:05:00	1587	11426,4
14:10:00	1590	11448,0
14:15:00	1594	11476,8
14:20:00	1597	11498,4
14:25:00	1600	11520,0
14:30:00	1603	11541,6
14:35:00	1607	11570,4
14:40:00	1610	11592,0
14:45:00	1613	11613,6
14:50:00	1616	11635,2
14:55:00	1620	11664,0
15:00:00	1624	11692,8
15:05:00	1627	11714,4
15:10:00	1630	11736,0
15:15:00	1633	11757,6
15:20:00	1636	11779,2
15:25:00	1639	11800,8
15:30:00	1643	11829,6
15:35:00	1646	11851,2
15:40:00	1649	11872,8
15:45:00	1652	11894,4
15:50:00	1655	11916,0
15:55:00	1658	11937,6
16:00:00	1661	11959,2
16:05:00	1665	11988,0
16:10:00	1668	12009,6
16:15:00	1671	12031,2
16:20:00	1674	12052,8
16:25:00	1677	12074,4
16:30:00	1680	12096,0
16:35:00	1683	12117,6
16:40:00	1687	12146,4
16:45:00	1690	12168,0
16:50:00	1692	12182,4

Hora	Medida	Volumen
16:55:00	1695	12204,0
17:00:00	1698	12225,6
17:05:00	1702	12254,4

17:10:00	1705	12276,0
17:15:00	1708	12297,6
17:20:00	1710	12312,0
17:25:00	1713	12333,6
17:30:00	1716	12355,2
17:35:00	1720	12384,0
17:40:00	1723	12405,6
17:45:00	1725	12420,0
17:50:00	1728	12441,6
17:55:00	1731	12463,2
18:00:00	1734	12484,8
18:05:00	1736	12499,2
18:10:00	1740	12528,0
18:15:00	1743	12549,6
18:20:00	1746	12571,2
18:25:00	1749	12592,8
18:30:00	1752	12614,4
18:35:00	1754	12628,8
18:40:00	1757	12650,4
18:45:00	1761	12679,2
18:50:00	1764	12700,8
18:55:00	1766	12715,2
19:00:00	1769	12736,8
19:05:00	1772	12758,4
19:10:00	1774	12772,8
19:15:00	1779	12808,8
19:20:00	1781	12823,2
19:25:00	1784	12844,8
19:30:00	1787	12866,4
19:35:00	1789	12880,8
19:40:00	1792	12902,4
19:45:00	1795	12924,0
19:50:00	1799	12952,8
19:55:00	1802	12974,4
20:00:00	1805	12996,0
20:05:00	1807	13010,4
20:10:00	1810	13032,0

Hora	Medida	Volumen
20:15:00	1813	13053,6
20:20:00	1815	13068,0
20:25:00	1819	13096,8
20:30:00	1822	13118,4

20:35:00	1825	13140,0
20:40:00	1827	13154,4
20:45:00	1830	13176,0
20:50:00	1833	13197,6
20:55:00	1835	13212,0
21:00:00	1839	13240,8
21:05:00	1842	13262,4
21:10:00	1845	13284,0
21:15:00	1848	13305,6
21:20:00	1850	13320,0
21:25:00	1853	13341,6
21:30:00	1857	13370,4
21:35:00	1859	13384,8
21:40:00	1862	13406,4
21:45:00	1865	13428,0
21:50:00	1867	13442,4
21:55:00	1870	13464,0
22:00:00	1873	13485,6
22:05:00	1877	13514,4
22:10:00	1880	13536,0
22:15:00	1883	13557,6
22:20:00	1885	13572,0
22:25:00	1888	13593,6
22:30:00	1891	13615,2
22:35:00	1893	13629,6
22:40:00	1897	13658,4
22:45:00	1900	13680,0
22:50:00	1903	13701,6
22:55:00	1906	13723,2
23:00:00	1908	13737,6
23:05:00	1911	13759,2
23:10:00	1915	13788,0
23:15:00	1917	13802,4
23:20:00	1920	13824,0
23:25:00	1923	13845,6
23:30:00	1926	13867,2

Hora	Medida	Volumen
23:35:00	1928	13881,6
23:40:00	1931	13903,2
23:45:00	1935	13932,0
23:50:00	1938	13953,6
23:55:00	1941	13975,2

0:00:00	1944	13996,8
0:05:00	1946	14011,2
0:10:00	1949	14032,8
0:15:00	1952	14054,4
0:20:00	1955	14076,0
0:25:00	1958	14097,6
0:30:00	1961	14119,2
0:35:00	1963	14133,6
0:40:00	1966	14155,2
0:45:00	1969	14176,8
0:50:00	1971	14191,2
0:55:00	1975	14220,0
1:00:00	1978	14241,6
1:05:00	1980	14256,0
1:10:00	1983	14277,6
1:15:00	1986	14299,2
1:20:00	1988	14313,6
1:25:00	1991	14335,2
1:30:00	1995	14364,0
1:35:00	1998	14385,6
1:40:00	2000	14400,0
1:45:00	2003	14421,6
1:50:00	2006	14443,2
1:55:00	2008	14457,6
2:00:00	2012	14486,4
2:05:00	2014	14500,8
2:10:00	2017	14522,4
2:15:00	2019	14536,8
2:20:00	2022	14558,4
2:25:00	2025	14580,0
2:30:00	2027	14594,4
2:35:00	2030	14616,0
2:40:00	2034	14644,8
2:45:00	2036	14659,2
2:50:00	2038	14673,6

Hora	Medida	Volumen
2:55:00	2041	14695,2
3:00:00	2044	14716,8
3:05:00	2046	14731,2
3:10:00	2049	14752,8
3:15:00	2053	14781,6
3:20:00	2055	14796,0

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

3:25:00	2058	14817,6
3:30:00	2061	14839,2
3:35:00	2063	14853,6
3:40:00	2066	14875,2
3:45:00	2069	14896,8
3:50:00	2072	14918,4
3:55:00	2075	14940,0
4:00:00	2077	14954,4
4:05:00	2080	14976,0
4:10:00	2083	14997,6
4:15:00	2085	15012,0
4:20:00	2088	15033,6
4:25:00	2092	15062,4
4:30:00	2095	15084,0
4:35:00	2097	15098,4
4:40:00	2099	15112,8
4:45:00	2102	15134,4
4:50:00	2104	15148,8
4:55:00	2107	15170,4
5:00:00	2111	15199,2
5:05:00	2113	15213,6
5:10:00	2116	15235,2
5:15:00	2119	15256,8
5:20:00	2121	15271,2
5:25:00	2123	15285,6
5:30:00	2126	15307,2
5:35:00	2130	15336,0
5:40:00	2132	15350,4
5:45:00	2135	15372,0
5:50:00	2137	15386,4
5:55:00	2140	15408,0
6:00:00	2142	15422,4
6:05:00	2144	15436,8
6:10:00	2147	15458,4

Hora	Medida	Volumen
6:15:00	2151	15487,2
6:20:00	2153	15501,6
6:25:00	2156	15523,2
6:30:00	2158	15537,6
6:35:00	2160	15552,0
6:40:00	2163	15573,6
6:45:00	2165	15588,0

6:50:00	2169	15616,8
6:55:00	2171	15631,2
7:00:00	2174	15652,8
7:05:00	2176	15667,2
7:10:00	2178	15681,6
7:15:00	2181	15703,2
7:20:00	2183	15717,6
7:25:00	2186	15739,2
7:30:00	2189	15760,8
7:35:00	2191	15775,2
7:40:00	2194	15796,8
7:45:00	2196	15811,2
7:50:00	2198	15825,6
7:55:00	2201	15847,2
8:00:00	2203	15861,6
8:05:00	2205	15876,0
8:10:00	2209	15904,8
8:15:00	2211	15919,2
8:20:00	2213	15933,6
8:25:00	2215	15948,0
8:30:00	2218	15969,6
8:35:00	2220	15984,0
8:40:00	2222	15998,4
8:45:00	2225	16020,0
8:50:00	2228	16041,6
8:55:00	2230	16056,0
9:00:00	2233	16077,6
9:05:00	2235	16092,0
9:10:00	2237	16106,4
9:15:00	2239	16120,8
9:20:00	2241	16135,2
9:25:00	2244	16156,8
9:30:00	2247	16178,4

Hora	Medida	Volumen
12:55:00	2338	16833,6
13:00:00	2340	16848,0
13:05:00	2342	16862,4
13:10:00	2345	16884,0
13:15:00	2347	16898,4
13:20:00	2349	16912,8
13:25:00	2351	16927,2
13:30:00	2353	16941,6

13:35:00	2355	16956,0
13:40:00	2357	16970,4
13:45:00	2359	16984,8
13:50:00	2361	16999,2
13:55:00	2362	17006,4
14:00:00	2365	17028,0
14:05:00	2367	17042,4
14:10:00	2369	17056,8
14:15:00	2371	17071,2
14:20:00	2373	17085,6
14:25:00	2375	17100,0
14:30:00	2377	17114,4
14:35:00	2379	17128,8
14:40:00	2381	17143,2
14:45:00	2384	17164,8
14:50:00	2386	17179,2
14:55:00	2388	17193,6
15:00:00	2390	17208,0
15:05:00	2391	17215,2
15:10:00	2393	17229,6
15:15:00	2395	17244,0
15:20:00	2397	17258,4
15:25:00	2399	17272,8
15:30:00	2401	17287,2
15:35:00	2403	17301,6
15:40:00	2405	17316,0
15:45:00	2407	17330,4
15:50:00	2409	17344,8
15:55:00	2411	17359,2
16:00:00	2413	17373,6
16:05:00	2415	17388,0
16:10:00	2417	17402,4

17:00:00	2436	17539,2
17:05:00	2438	17553,6
17:10:00	2440	17568,0
17:15:00	2443	17589,6
17:20:00	2445	17604,0
17:25:00	2447	17618,4
17:30:00	2448	17625,6
17:35:00	2450	17640,0
17:40:00	2452	17654,4
17:45:00	2454	17668,8
17:50:00	2456	17683,2
17:55:00	2457	17690,4
18:00:00	2459	17704,8
18:05:00	2462	17726,4
18:10:00	2464	17740,8
18:15:00	2466	17755,2
18:20:00	2468	17769,6
18:25:00	2469	17776,8
18:30:00	2471	17791,2
18:35:00	2473	17805,6
18:40:00	2475	17820,0
18:45:00	2477	17834,4
18:50:00	2479	17848,8
18:55:00	2481	17863,2
19:00:00	2483	17877,6
Continúa hasta el 10/04/07		
18:00:00	3953	28461,6
18:05:00	3954	28468,8
18:10:00	3954	28468,8
18:15:00	3955	28476,0

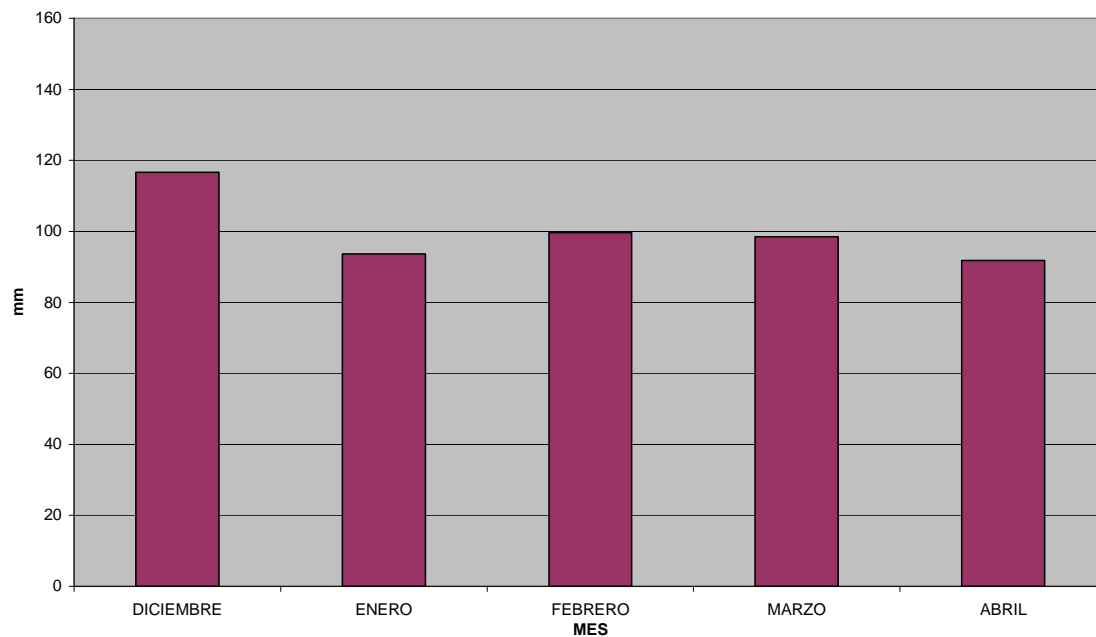
Hora	Medida	Volumen
16:15:00	2419	17416,8
16:20:00	2420	17424,0
16:25:00	2423	17445,6
16:30:00	2425	17460,0
16:35:00	2427	17474,4
16:40:00	2429	17488,8
16:45:00	2431	17503,2
16:50:00	2432	17510,4
16:55:00	2434	17524,8

Lluvias naturales:

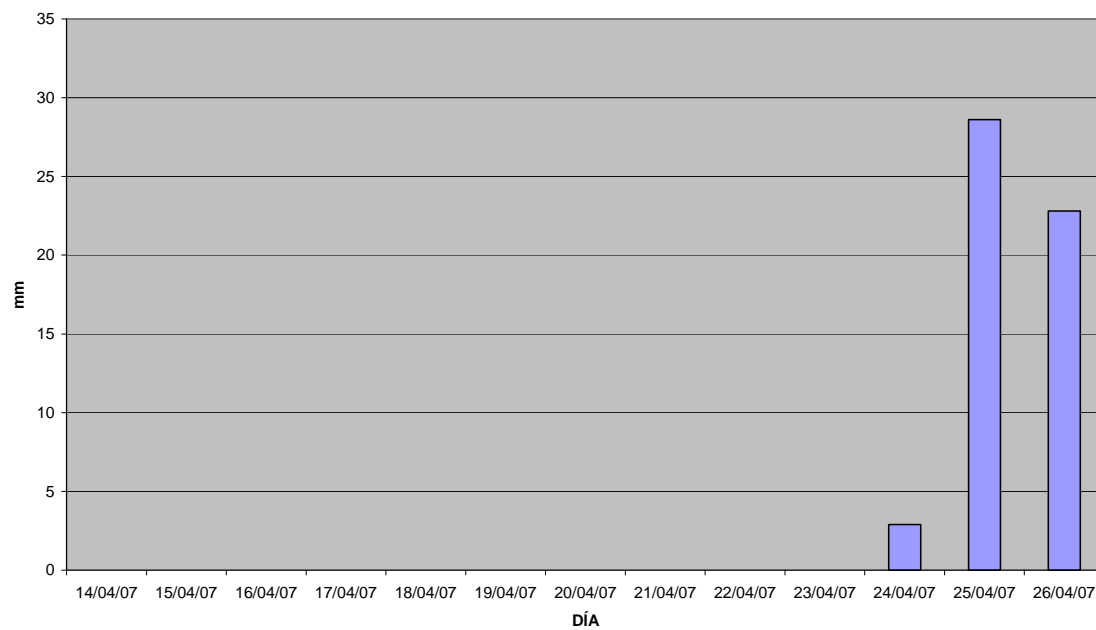
Plaza 8 (sección tipo BA): del 29 de marzo al 16 de mayo de 2007.

Afluente: serie 3 del 24 y 25 de abril.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde diciembre de 2006 y hasta abril de 2007



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 8 (sección tipo BA): del 29 de marzo al 16 de mayo de 2007.

Efluente: serie 3 del 24 y 25 de abril.

Efluente BA, serie 3		
Hora	Medida	Volumen
17:55:00	0	0
18:00:00	1	7,2
18:05:00	2	14,4
18:10:00	3	21,6
18:15:00	4	28,8
18:20:00	5	36,0
18:25:00	6	43,2
18:30:00	7	50,4
18:35:00	7	50,4
18:40:00	8	57,6
18:45:00	9	64,8
18:50:00	10	72,0
18:55:00	11	79,2
19:00:00	12	86,4
19:05:00	13	93,6
19:10:00	14	100,8
19:15:00	15	108,0
19:20:00	17	122,4
19:25:00	18	129,6
19:30:00	19	136,8
19:35:00	20	144,0
19:40:00	21	151,2
19:45:00	22	158,4
19:50:00	24	172,8
19:55:00	25	180,0
20:00:00	25	180,0
20:05:00	27	194,4
20:10:00	28	201,6
20:15:00	29	208,8
20:20:00	30	216,0
20:25:00	31	223,2
20:30:00	32	230,4
20:35:00	34	244,8
20:40:00	36	259,2
20:45:00	37	266,4

Hora	Medida	Volumen
20:50:00	38	273,6
20:55:00	39	280,8
21:00:00	40	288,0
21:05:00	41	295,2
21:10:00	42	302,4
21:15:00	43	309,6
21:20:00	44	316,8
21:25:00	45	324,0
21:30:00	46	331,2
21:35:00	47	338,4
21:40:00	48	345,6
21:45:00	50	360,0
21:50:00	51	367,2
21:55:00	53	381,6
22:00:00	56	403,2
22:05:00	58	417,6
22:10:00	60	432,0
22:15:00	62	446,4
22:20:00	65	468,0
22:25:00	67	482,4
22:30:00	70	504,0
22:35:00	73	525,6
22:40:00	78	561,6
22:45:00	82	590,4
22:50:00	88	633,6
22:55:00	96	691,2
23:00:00	101	727,2
23:05:00	110	792,0
23:10:00	120	864,0
23:15:00	129	928,8
23:20:00	139	1000,8
23:25:00	153	1101,6
23:30:00	167	1202,4
23:35:00	182	1310,4
23:40:00	204	1468,8
23:45:00	225	1620,0
23:50:00	256	1843,2

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

Hora	Medida	Volumen
23:55:00	294	2116,8
0:00:00	341	2455,2
0:05:00	408	2937,6
0:10:00	472	3398,4
0:15:00	542	3902,4
0:20:00	627	4514,4
0:25:00	716	5155,2
0:30:00	786	5659,2
0:35:00	896	6451,2
0:40:00	1022	7358,4
0:45:00	1120	8064,0
0:50:00	1266	9115,2
0:55:00	1408	10137,6
1:00:00	1530	11016,0
1:05:00	1653	11901,6
1:10:00	1797	12938,4
1:15:00	1918	13809,6
1:20:00	2044	14716,8
1:25:00	2190	15768,0
1:30:00	2313	16653,6
1:35:00	2454	17668,8
1:40:00	2576	18547,2
1:45:00	2695	19404,0
1:50:00	2835	20412,0
1:55:00	2960	21312,0
2:00:00	3095	22284,0
2:05:00	3258	23457,6
2:10:00	3426	24667,2
2:15:00	3547	25538,4
2:20:00	3719	26776,8
2:25:00	3894	28036,8
2:30:00	4022	28958,4
2:35:00	4211	30319,2
2:40:00	4412	31766,4
2:45:00	4595	33084,0
2:50:00	4776	34387,2
2:55:00	4975	35820,0
3:00:00	5139	37000,8
3:05:00	5297	38138,4
3:10:00	5476	39427,2

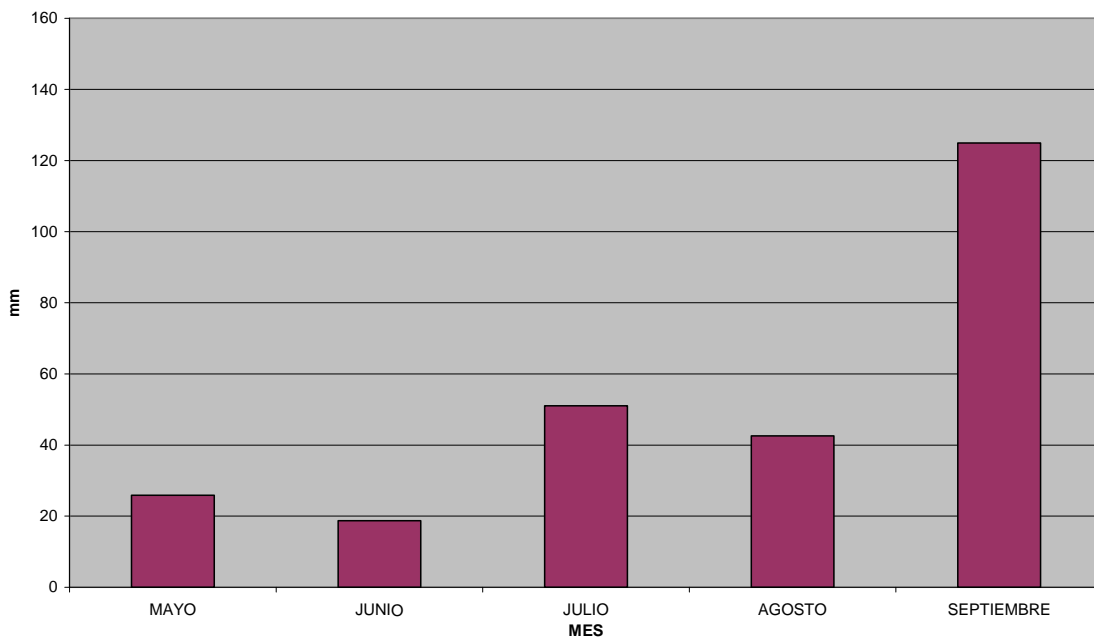
Hora	Medida	Volumen
3:15:00	5628	40521,6
3:20:00	5809	41824,8
3:25:00	5981	43063,2
3:30:00	6188	44553,6
3:35:00	6469	46576,8
3:40:00	6731	48463,2
3:45:00	7001	50407,2
3:50:00	7307	52610,4
3:55:00	7610	54792,0
4:00:00	7825	56340,0
4:05:00	8132	58550,4
4:10:00	8435	60732,0
4:15:00	8650	62280,0
4:20:00	8942	64382,4
4:25:00	9219	66376,8
4:30:00	9444	67996,8
4:35:00	9661	69559,2
4:40:00	9665	69588,0
4:45:00	9665	69588,0

Lluvias naturales:

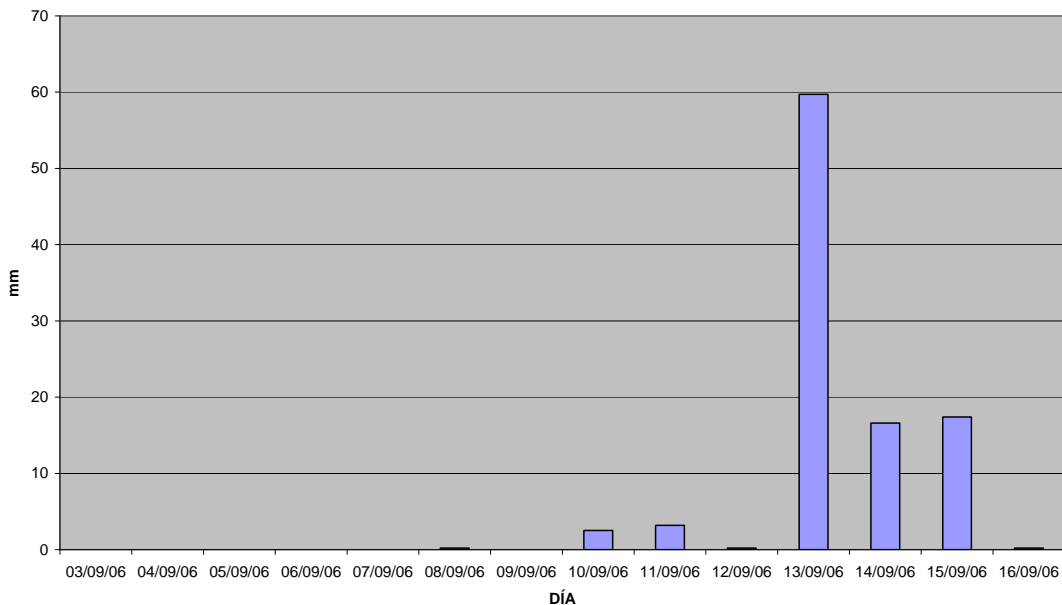
Plaza 12 (sección tipo PA): del 11 al 18 de septiembre de 2006.

Afluente: serie 1 del 13 al 15 de septiembre.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde mayo de 2006 y hasta septiembre de 2006



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 12 (sección tipo PA): del 11 al 18 de septiembre de 2006.

Efluente: serie 1 del 13 al 15 de septiembre.

Efluente PA, serie 1		
Hora	Medida	Volumen
21:55	0	0
22:00	4	28,8
22:05	115	828,0
22:10	297	2138,4
22:15	332	2390,4
22:20	332	2390,4
22:25	333	2397,6
22:30	550	3960,0
22:35	550	3960,0
22:40	550	3960,0
22:45	550	3960,0
22:50	550	3960,0
22:55	550	3960,0
23:00	550	3960,0
23:05	550	3960,0
23:10	550	3960,0
23:15	866	6235,2
23:20	1158	8337,6
23:25	1209	8704,8
23:30	1209	8704,8
23:35	1209	8704,8
23:40	1209	8704,8
23:45	1280	9216,0
23:50	1470	10584,0
23:55	1574	11332,8
0:00	1580	11376,0
0:05	1580	11376,0
0:10	1580	11376,0
0:15	1580	11376,0
0:20	1580	11376,0
0:25	1580	11376,0
0:30	1580	11376,0
0:35	1580	11376,0
0:40	1580	11376,0
0:45	1580	11376,0

Hora	Medida	Volumen
0:50	1580	11376,0
0:55	1580	11376,0
1:00	1580	11376,0
1:05	1580	11376,0
1:10	1580	11376,0
1:15	1580	11376,0
1:20	1580	11376,0
1:25	1580	11376,0
1:30	1580	11376,0
1:35	1580	11376,0
1:40	1580	11376,0
1:45	1580	11376,0
1:50	1580	11376,0
1:55	1580	11376,0
2:00	1580	11376,0
2:05	1580	11376,0
2:10	1580	11376,0
2:15	1580	11376,0
2:20	1580	11376,0
2:25	1580	11376,0
2:30	1580	11376,0
2:35	1580	11376,0
2:40	1580	11376,0
2:45	1580	11376,0
2:50	1580	11376,0
2:55	1580	11376,0
3:00	1580	11376,0
3:05	1580	11376,0
3:10	1580	11376,0
3:15	1580	11376,0
3:20	1580	11376,0
3:25	1580	11376,0
3:30	1580	11376,0
3:35	1580	11376,0
3:40	1580	11376,0
3:45	1580	11376,0
3:50	1580	11376,0

Hora	Medida	Volumen
3:55	1580	11376,0
4:00	1580	11376,0
4:05	1580	11376,0
4:10	1580	11376,0
4:15	1580	11376,0
4:20	1580	11376,0
4:25	1580	11376,0
4:30	1580	11376,0
4:35	1580	11376,0
4:40	1580	11376,0
4:45	1580	11376,0
4:50	1580	11376,0
4:55	1580	11376,0
5:00	1580	11376,0
5:05	1580	11376,0
5:10	1580	11376,0
5:15	1580	11376,0
5:20	1580	11376,0
5:25	1580	11376,0
5:30	1580	11376,0
5:35	1580	11376,0
5:40	1580	11376,0
5:45	1580	11376,0
5:50	1591	11455,2
5:55	1607	11570,4
6:00	1611	11599,2
6:05	1611	11599,2
6:10	1611	11599,2
6:15	1611	11599,2
6:20	1611	11599,2
6:25	1611	11599,2
6:30	1611	11599,2
6:35	1611	11599,2
6:40	1611	11599,2
6:45	1611	11599,2
6:50	1641	11815,2
6:55	1664	11980,8
7:00	1664	11980,8
7:05	1664	11980,8
7:10	1670	12024,0

Hora	Medida	Volumen
7:15	1804	12988,8
7:20	1916	13795,2
7:25	2127	15314,4
7:30	2308	16617,6
7:35	2355	16956,0
7:40	2360	16992,0
7:45	2360	16992,0
7:50	2360	16992,0
7:55	2360	16992,0
8:00	2360	16992,0
8:05	2360	16992,0
8:10	2360	16992,0
8:15	2360	16992,0
8:20	2360	16992,0
8:25	2360	16992,0
8:30	2360	16992,0
8:35	2360	16992,0
8:40	2360	16992,0
8:45	2360	16992,0
8:50	2360	16992,0
8:55	2360	16992,0
9:00	2360	16992,0
9:05	2360	16992,0
9:10	2360	16992,0
9:15	2360	16992,0
9:20	2360	16992,0
9:25	2360	16992,0
9:30	2360	16992,0
9:35	2360	16992,0
9:40	2360	16992,0
9:45	2360	16992,0
9:50	2360	16992,0
9:55	2360	16992,0
10:00	2360	16992,0
10:05	2360	16992,0
10:10	2360	16992,0
10:15	2360	16992,0
10:20	2360	16992,0
10:25	2360	16992,0
10:30	2360	16992,0

Hora	Medida	Volumen
------	--------	---------

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

10:35	2360	16992,0
10:40	2360	16992,0
10:45	2360	16992,0
10:50	2360	16992,0
10:55	2360	16992,0
11:00	2360	16992,0
11:05	2360	16992,0
11:10	2360	16992,0
11:15	2360	16992,0
11:20	2360	16992,0
11:25	2360	16992,0
11:30	2360	16992,0
11:35	2360	16992,0
11:40	2360	16992,0
11:45	2360	16992,0
11:50	2360	16992,0
11:55	2360	16992,0
12:00	2360	16992,0
12:05	2360	16992,0
12:10	2360	16992,0
12:15	2360	16992,0
12:20	2360	16992,0
12:25	2360	16992,0
12:30	2360	16992,0
12:35	2360	16992,0
12:40	2360	16992,0
12:45	2360	16992,0
12:50	2360	16992,0
12:55	2360	16992,0
13:00	2360	16992,0
13:05	2360	16992,0
13:10	2360	16992,0
13:15	2360	16992,0
13:20	2360	16992,0
13:25	2360	16992,0
13:30	2360	16992,0
13:35	2360	16992,0
13:40	2360	16992,0
13:45	2360	16992,0
13:50	2360	16992,0

Hora	Medida	Volumen
13:55	2360	16992,0

14:00	2360	16992,0
14:05	2360	16992,0
14:10	2360	16992,0
14:15	2360	16992,0
14:20	2360	16992,0
14:25	2360	16992,0
14:30	2360	16992,0
14:35	2360	16992,0
14:40	2360	16992,0
14:45	2360	16992,0
14:50	2360	16992,0
14:55	2360	16992,0
15:00	2360	16992,0
15:05	2360	16992,0
15:10	2360	16992,0
15:15	2360	16992,0
15:20	2360	16992,0
15:25	2360	16992,0
15:30	2360	16992,0
15:35	2360	16992,0
15:40	2360	16992,0
15:45	2360	16992,0
15:50	2360	16992,0
15:55	2360	16992,0
16:00	2360	16992,0
16:05	2360	16992,0
16:10	2360	16992,0
16:15	2360	16992,0
16:20	2360	16992,0
16:25	2360	16992,0
16:30	2360	16992,0
16:35	2360	16992,0
16:40	2360	16992,0
16:45	2360	16992,0
16:50	2360	16992,0
16:55	2360	16992,0
17:00	2360	16992,0
17:05	2360	16992,0
17:10	2360	16992,0

Hora	Medida	Volumen
17:15	2360	16992,0
17:20	2360	16992,0

17:25	2360	16992,0
17:30	2360	16992,0
17:35	2360	16992,0
17:40	2360	16992,0
17:45	2360	16992,0
17:50	2360	16992,0
17:55	2360	16992,0
18:00	2360	16992,0
18:05	2360	16992,0
18:10	2360	16992,0
18:15	2360	16992,0
18:20	2360	16992,0
18:25	2360	16992,0
18:30	2360	16992,0
18:35	2360	16992,0
18:40	2360	16992,0
18:45	2360	16992,0
18:50	2360	16992,0
18:55	2360	16992,0
19:00	2360	16992,0
19:05	2360	16992,0
19:10	2360	16992,0
19:15	2360	16992,0
19:20	2360	16992,0
19:25	2360	16992,0
19:30	2360	16992,0
19:35	2360	16992,0
19:40	2360	16992,0
19:45	2360	16992,0
19:50	2360	16992,0
19:55	2360	16992,0
20:00	2360	16992,0
20:05	2360	16992,0
20:10	2360	16992,0
20:15	2360	16992,0
20:20	2360	16992,0
20:25	2360	16992,0
20:30	2360	16992,0

Hora	Medida	Volumen
20:35	2360	16992,0
20:40	2360	16992,0
20:45	2360	16992,0

20:50	2360	16992,0
20:55	2360	16992,0
21:00	2360	16992,0
21:05	2360	16992,0
21:10	2360	16992,0
21:15	2360	16992,0
21:20	2360	16992,0
21:25	2360	16992,0
21:30	2360	16992,0
21:35	2360	16992,0
21:40	2360	16992,0
21:45	2360	16992,0
21:50	2360	16992,0
21:55	2360	16992,0
22:00	2360	16992,0
22:05	2360	16992,0
22:10	2360	16992,0
22:15	2360	16992,0
22:20	2360	16992,0
22:25	2360	16992,0
22:30	2360	16992,0
22:35	2360	16992,0
22:40	2360	16992,0
22:45	2360	16992,0
22:50	2360	16992,0
22:55	2360	16992,0
23:00	2360	16992,0
23:05	2360	16992,0
23:10	2360	16992,0
23:15	2360	16992,0
23:20	2360	16992,0
23:25	2360	16992,0
23:30	2360	16992,0
23:35	2360	16992,0
23:40	2360	16992,0
23:45	2360	16992,0
23:50	2360	16992,0

Hora	Medida	Volumen
23:55	2360	16992,0
0:00	2360	16992,0
0:05	2360	16992,0
0:10	2360	16992,0

Anexo 5: Funcionalidad de firmes permeables

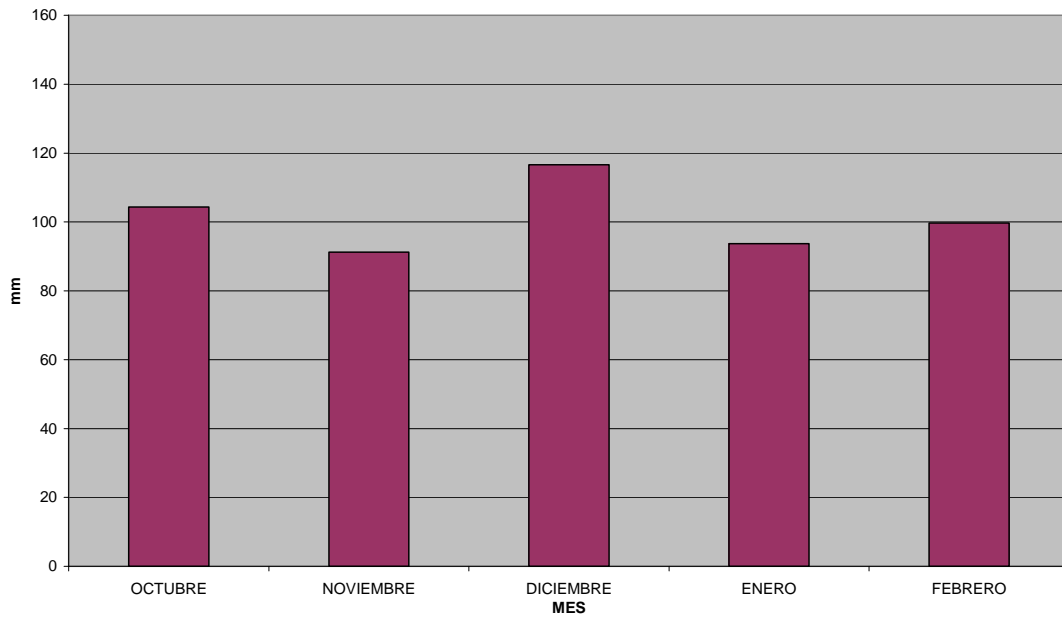
0:15	2360	16992,0
0:20	2360	16992,0
0:25	2360	16992,0
0:30	2360	16992,0
0:35	2360	16992,0
0:40	2360	16992,0
0:45	2360	16992,0
0:50	2360	16992,0
0:55	2360	16992,0
1:00	2360	16992,0
1:05	2360	16992,0
1:10	2360	16992,0
1:15	2360	16992,0
1:20	2360	16992,0
1:25	2360	16992,0
1:30	2360	16992,0
1:35	2360	16992,0
1:40	2360	16992,0
1:45	2360	16992,0
1:50	2360	16992,0
1:55	2360	16992,0
2:00	2360	16992,0
2:05	2360	16992,0
2:10	2360	16992,0
2:15	2360	16992,0
2:20	2360	16992,0
2:25	2360	16992,0
2:30	2360	16992,0
2:35	2817	20282,4
2:40	3456	24883,2
2:45	3671	26431,2
2:50	3739	26920,8
2:55	3786	27259,2
3:00	3803	27381,6
3:05	3805	27396,0
3:10	3805	27396,0

Lluvias naturales:

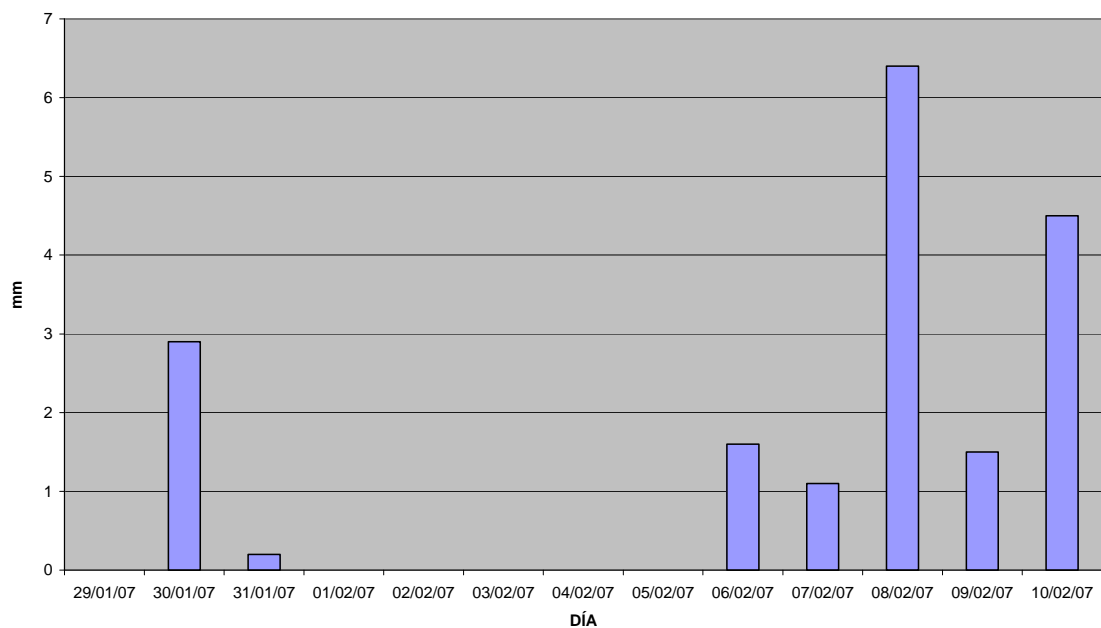
Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Afluente: serie 1 del 9 de febrero.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde octubre de 2006 y hasta febrero de 2007



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Efluente: serie 1 del 9 de febrero.

Efluente PR, serie 1		
Hora	Medida	Volumen
0:30:00	0	0
0:35:00	1	7,2
0:40:00	29	208,8
0:45:00	80	576,0
0:50:00	88	633,6
0:55:00	95	684,0
1:00:00	147	1058,4
1:05:00	216	1555,2
1:10:00	300	2160,0
1:15:00	374	2692,8
1:20:00	446	3211,2
1:25:00	499	3592,8
1:30:00	556	4003,2
1:35:00	601	4327,2
1:40:00	642	4622,4
1:45:00	685	4932,0
1:50:00	719	5176,8
1:55:00	751	5407,2
2:00:00	784	5644,8
2:05:00	808	5817,6
2:10:00	824	5932,8
2:15:00	847	6098,4
2:20:00	868	6249,6
2:25:00	885	6372,0
2:30:00	902	6494,4
2:35:00	921	6631,2
2:40:00	936	6739,2
2:45:00	952	6854,4
2:50:00	967	6962,4
2:55:00	978	7041,6
3:00:00	992	7142,4
3:05:00	1003	7221,6
3:10:00	1013	7293,6
3:15:00	1024	7372,8
3:20:00	1032	7430,4

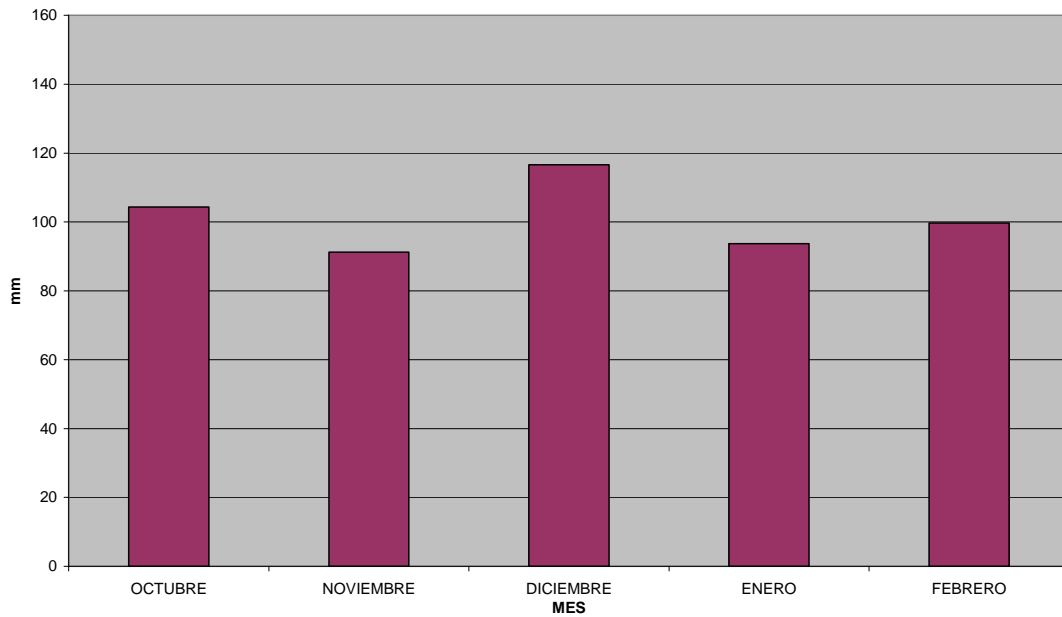
Hora	Medida	Volumen
3:25:00	1041	7495,2
3:30:00	1050	7560,0
3:35:00	1058	7617,6
3:40:00	1063	7653,6
3:45:00	1069	7696,8
3:50:00	1076	7747,2
3:55:00	1080	7776,0
4:00:00	1085	7812,0
4:05:00	1090	7848,0
4:10:00	1094	7876,8
4:15:00	1098	7905,6
4:20:00	1101	7927,2
4:25:00	1104	7948,8
4:30:00	1106	7963,2
4:35:00	1109	7984,8
4:40:00	1112	8006,4
4:45:00	1114	8020,8
4:50:00	1116	8035,2
4:55:00	1117	8042,4
5:00:00	1119	8056,8
5:05:00	1121	8071,2
5:10:00	1122	8078,4
5:15:00	1124	8092,8
5:20:00	1125	8100,0
5:25:00	1126	8107,2
5:30:00	1127	8114,4
5:35:00	1128	8121,6
5:40:00	1128	8121,6
5:45:00	1129	8128,8
5:50:00	1129	8128,8
5:55:00	1131	8143,2
6:00:00	1131	8143,2
6:05:00	1131	8143,2
6:10:00	1131	8143,2
6:15:00	1131	8143,2
6:20:00	1132	8150,4
6:25:00	1132	8150,4

Lluvias naturales:

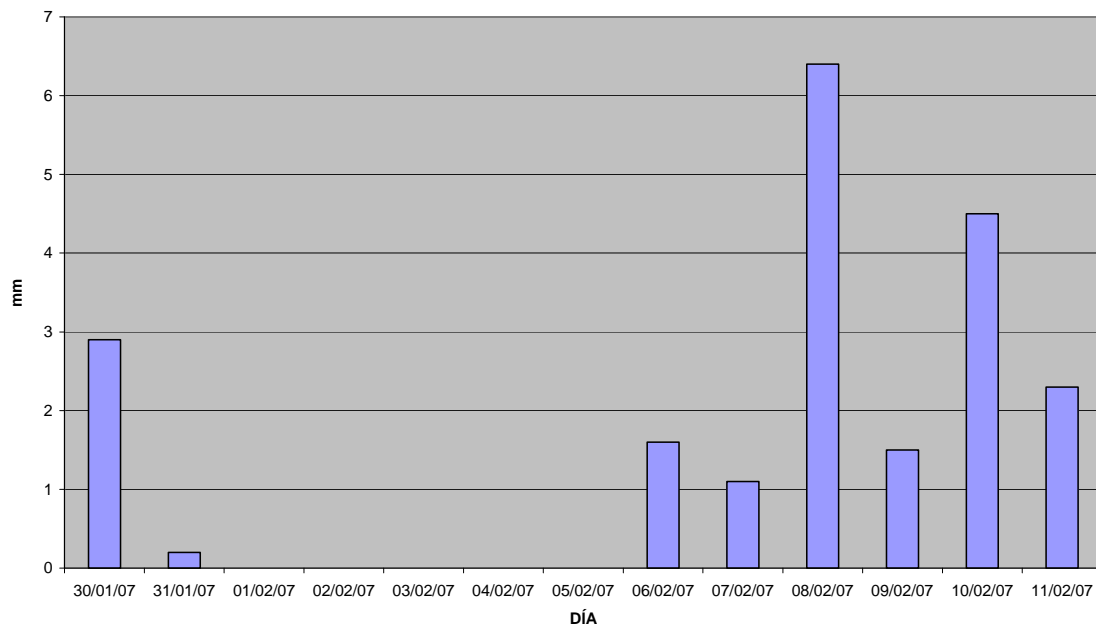
Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Afluente: serie 2 del 10 de febrero.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde octubre de 2006 y hasta febrero de 2007



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Efluente: serie 2 del 10 de febrero.

Efluente PR, serie 2		
Hora	Medida	Volumen
2:35:00	0	0
2:40:00	23	165,6
2:45:00	177	1274,4
2:50:00	598	4305,6
2:55:00	1057	7610,4
3:00:00	1379	9928,8
3:05:00	1626	11707,2
3:10:00	1860	13392,0
3:15:00	2027	14594,4
3:20:00	2122	15278,4
3:25:00	2122	15278,4
3:30:00	2125	15300,0
3:35:00	2129	15328,8
3:40:00	2194	15796,8
3:45:00	2274	16372,8
3:50:00	2355	16956,0
3:55:00	2427	17474,4
4:00:00	2472	17798,4
4:05:00	2532	18230,4
4:10:00	2586	18619,2
4:15:00	2622	18878,4
4:20:00	2667	19202,4
4:25:00	2708	19497,6
4:30:00	2740	19728,0
4:35:00	2771	19951,2
4:40:00	2800	20160,0
4:45:00	2823	20325,6
4:50:00	2844	20476,8
4:55:00	2867	20642,4
5:00:00	2885	20772,0
5:05:00	2907	20930,4
5:10:00	2923	21045,6
5:15:00	2938	21153,6
5:20:00	2955	21276,0
5:25:00	2970	21384,0

Hora	Medida	Volumen
5:30:00	2983	5:30:00
5:35:00	2998	5:35:00
5:40:00	3012	5:40:00
5:45:00	3020	5:45:00
5:50:00	3033	5:50:00
5:55:00	3043	5:55:00
6:00:00	3051	6:00:00
6:05:00	3060	6:05:00
6:10:00	3069	6:10:00
6:15:00	3075	6:15:00
6:20:00	3080	6:20:00
6:25:00	3087	6:25:00
6:30:00	3092	6:30:00
6:35:00	3096	6:35:00
6:40:00	3100	6:40:00
6:45:00	3104	6:45:00
6:50:00	3108	6:50:00
6:55:00	3111	6:55:00
7:00:00	3114	7:00:00
7:05:00	3116	7:05:00
7:10:00	3119	7:10:00
7:15:00	3121	7:15:00
7:20:00	3124	7:20:00
7:25:00	3126	7:25:00
7:30:00	3128	7:30:00
7:35:00	3130	7:35:00
7:40:00	3131	7:40:00
7:45:00	3132	7:45:00
7:50:00	3134	7:50:00
7:55:00	3135	7:55:00
8:00:00	3136	8:00:00
8:05:00	3137	8:05:00
8:10:00	3138	8:10:00
8:15:00	3138	8:15:00
8:20:00	3139	8:20:00
8:25:00	3139	8:25:00
8:30:00	3140	8:30:00

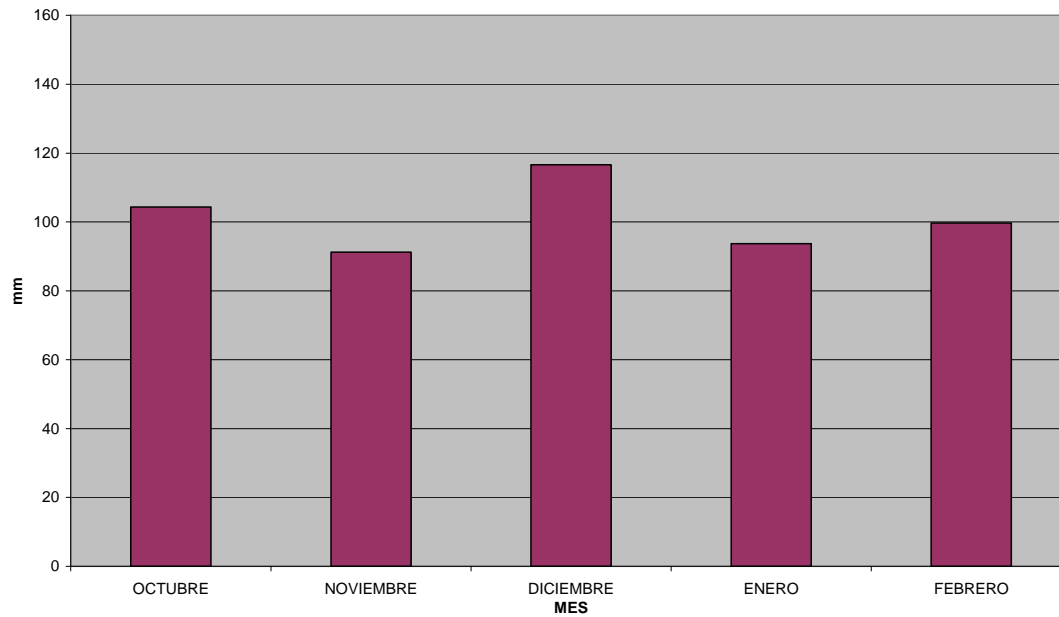
Hora	Medida	Volumen
8:35:00	3140	8:35:00
8:40:00	3142	8:40:00
8:45:00	3142	8:45:00
8:50:00	3142	8:50:00
8:55:00	3143	8:55:00
9:00:00	3143	9:00:00

Lluvias naturales:

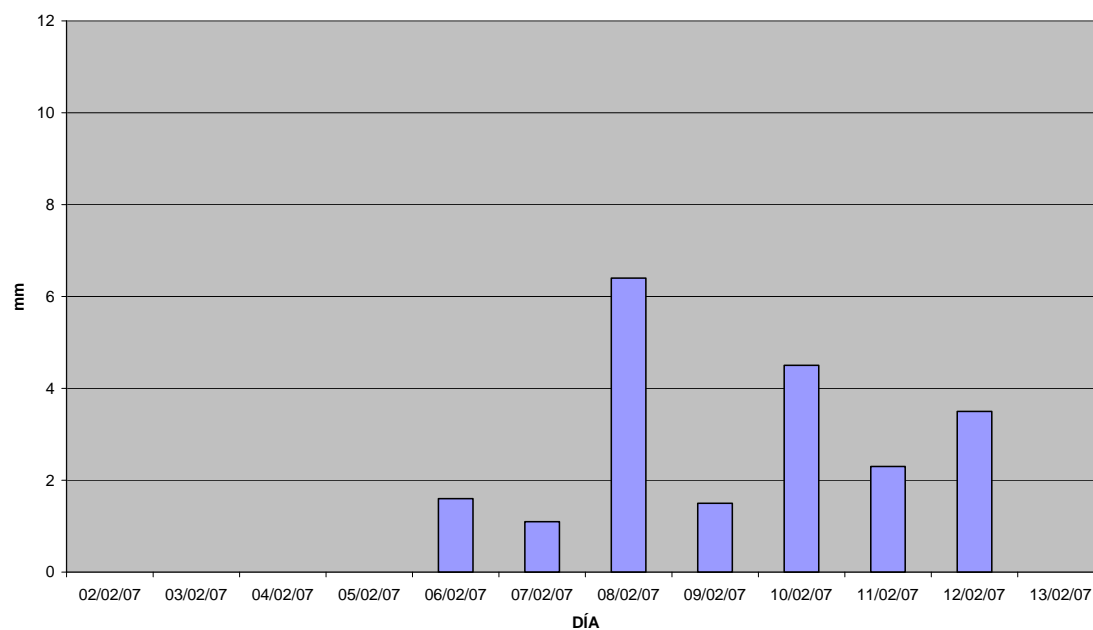
Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Afluente: serie 3 del 12 de febrero.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde octubre de 2006 y hasta febrero de 2007



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Efluente: serie 3 del 12 de febrero.

Efluente PA, serie 3		
Hora	Medida	Volumen
4:50:00	0	0
4:55:00	1	7,2
5:00:00	5	36,0
5:05:00	23	165,6
5:10:00	54	388,8
5:15:00	89	640,8
5:20:00	138	993,6
5:25:00	191	1375,2
5:30:00	261	1879,2
5:35:00	346	2491,2
5:40:00	388	2793,6
5:45:00	389	2800,8
5:50:00	392	2822,4
5:55:00	394	2836,8
6:00:00	414	2980,8
6:05:00	425	3060,0
6:10:00	440	3168,0
6:15:00	476	3427,2
6:20:00	538	3873,6
6:25:00	619	4456,8
6:30:00	706	5083,2
6:35:00	783	5637,6
6:40:00	831	5983,2
6:45:00	893	6429,6
6:50:00	950	6840,0
6:55:00	994	7156,8
7:00:00	1033	7437,6
7:05:00	1072	7718,4
7:10:00	1101	7927,2
7:15:00	1125	8100,0
7:20:00	1149	8272,8
7:25:00	1171	8431,2
7:30:00	1194	8596,8
7:35:00	1213	8733,6
7:40:00	1232	8870,4

Hora	Medida	Volumen
7:45:00	1253	9021,6
7:50:00	1270	9144,0
7:55:00	1286	9259,2
8:00:00	1304	9388,8
8:05:00	1321	9511,2
8:10:00	1331	9583,2
8:15:00	1347	9698,4
8:20:00	1361	9799,2
8:25:00	1371	9871,2
8:30:00	1384	9964,8
8:35:00	1396	10051,2
8:40:00	1406	10123,2
8:45:00	1416	10195,2
8:50:00	1425	10260,0
8:55:00	1434	10324,8
9:00:00	1442	10382,4
9:05:00	1451	10447,2
9:10:00	1457	10490,4
9:15:00	1464	10540,8
9:20:00	1470	10584,0
9:25:00	1475	10620,0
9:30:00	1480	10656,0
9:35:00	1485	10692,0
9:40:00	1489	10720,8
9:45:00	1493	10749,6
9:50:00	1496	10771,2
9:55:00	1499	10792,8
10:00:00	1502	10814,4
10:05:00	1506	10843,2
10:10:00	1508	10857,6
10:15:00	1510	10872,0
10:20:00	1513	10893,6
10:25:00	1515	10908,0
10:30:00	1517	10922,4
10:35:00	1519	10936,8
10:40:00	1520	10944,0
10:45:00	1523	10965,6

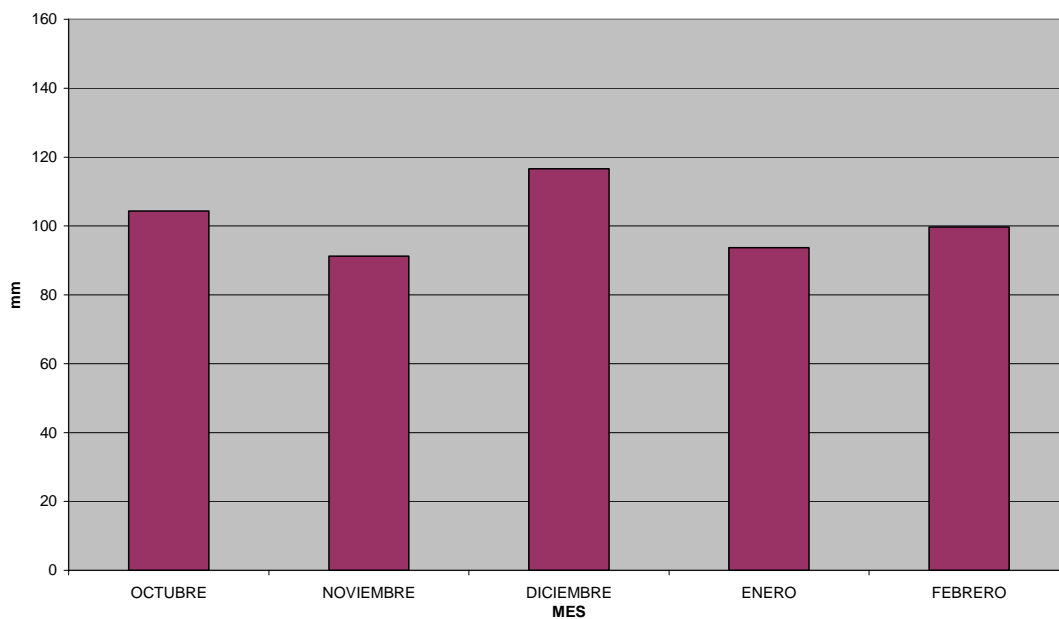
Hora	Medida	Volumen
10:50:00	1525	10980,0
10:55:00	1526	10987,2
11:00:00	1527	10994,4
11:05:00	1528	11001,6
11:10:00	1529	11008,8
11:15:00	1530	11016,0
11:20:00	1531	11023,2
11:25:00	1531	11023,2
11:30:00	1532	11030,4
11:35:00	1532	11030,4
11:40:00	1533	11037,6
11:45:00	1533	11037,6
11:50:00	1533	11037,6
11:55:00	1534	11044,8
12:00:00	1534	11044,8

Lluvias naturales:

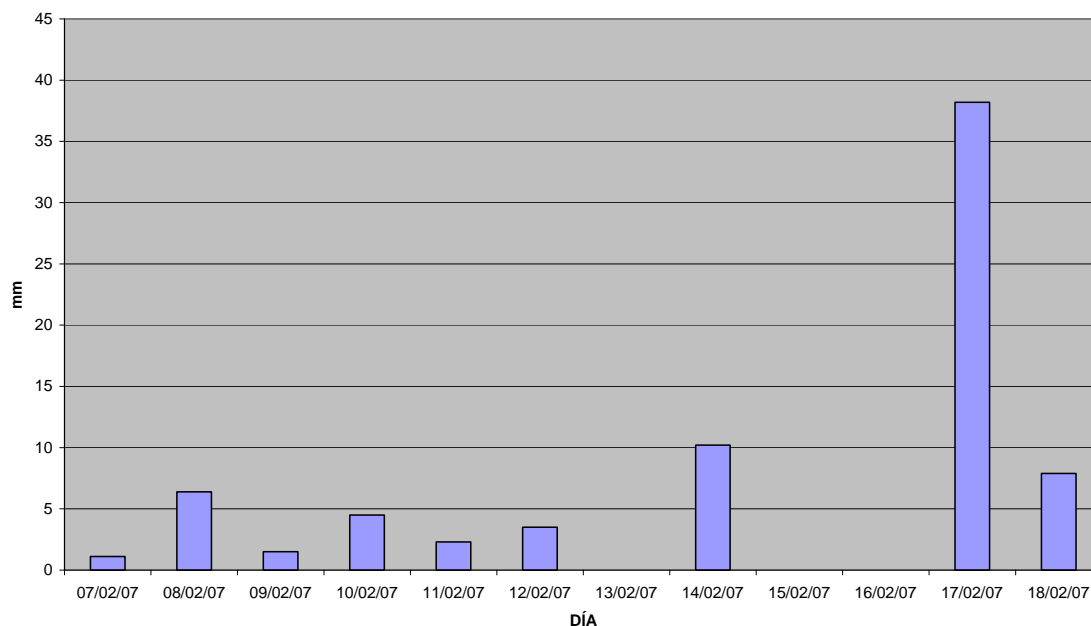
Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Afluente: serie 4 del 17 de febrero.

Precipitación mensual total en GIJÓN desde octubre de 2006 y hasta febrero de 2007



PRECIPITACIÓN DIARIA



Lluvias naturales:

Plaza 14 (sección tipo PR): del 7 al 28 de febrero de 2007.

Efluente: serie 4 del 17 de febrero.

Efluente PR, serie 4			Hora	Medida	Volumen
Hora	Medida	Volumen			
8:25:00	0	0	11:20:00	2587	18626,4
8:30:00	17	122,4	11:25:00	2594	18676,8
8:35:00	67	482,4	11:30:00	2594	18676,8
8:40:00	122	878,4	11:35:00	2628	18921,6
8:45:00	181	1303,2	11:40:00	2776	19987,2
8:50:00	233	1677,6	11:45:00	2966	21355,2
8:55:00	296	2131,2	11:50:00	3131	22543,2
9:00:00	361	2599,2	11:55:00	3317	23882,4
9:05:00	424	3052,8	12:00:00	3575	25740,0
9:10:00	464	3340,8	12:05:00	3809	27424,8
9:15:00	514	3700,8	12:10:00	4100	29520,0
9:20:00	588	4233,6	12:15:00	4366	31435,2
9:25:00	676	4867,2	12:20:00	4647	33458,4
9:30:00	755	5436,0	12:25:00	4961	35719,2
9:35:00	807	5810,4	12:30:00	5229	37648,8
9:40:00	876	6307,2	12:35:00	5520	39744,0
9:45:00	941	6775,2	12:40:00	5901	42487,2
9:50:00	995	7164,0	12:45:00	6321	45511,2
9:55:00	1050	7560,0	12:50:00	6645	47844,0
10:00:00	1117	8042,4	12:55:00	7168	51609,6
10:05:00	1178	8481,6	13:00:00	7721	55591,2
10:10:00	1246	8971,2	13:05:00	8101	58327,2
10:15:00	1329	9568,8	13:10:00	8617	62042,4
10:20:00	1348	9705,6	13:15:00	9137	65786,4
10:25:00	1407	10130,4	13:20:00	9616	69235,2
10:30:00	1407	10130,4	13:25:00	9643	69429,6
10:35:00	1407	10130,4	13:30:00	9643	69429,6
10:40:00	1407	10130,4			
10:45:00	1408	10137,6			
10:50:00	1562	11246,4			
10:55:00	1768	12729,6			
11:00:00	1944	13996,8			
11:05:00	2114	15220,8			
11:10:00	2307	16610,4			
11:15:00	2489	17920,8			

Lluvias simuladas:

Plaza 6 (sección tipo BR): día 1.

Hora	Medida	Volumen	%
14:05:30	0	0,0	0,0
14:08:15	1	7,0	0,0
14:12:10	2	14,0	0,1
14:12:55	3	21,0	0,1
14:13:40	5	35,1	0,1
14:14:30	6	42,1	0,2
14:15:15	8	56,1	0,2
14:16:05	10	70,1	0,3
14:16:50	13	91,1	0,4
14:17:40	15	105,2	0,4
14:18:25	19	133,2	0,5
14:19:10	22	154,2	0,6
14:20:00	24	168,2	0,7
14:20:45	27	189,3	0,8
14:21:35	30	210,3	0,8
14:22:20	35	245,4	1,0
14:23:10	38	266,4	1,1
14:23:55	41	287,4	1,1
14:24:40	44	308,4	1,2
14:25:30	48	336,5	1,3
14:26:15	52	364,5	1,5
14:27:00	55	385,6	1,5
14:27:50	58	406,6	1,6
14:28:35	62	434,6	1,7
14:29:25	65	455,7	1,8
14:30:10	69	483,7	1,9
14:31:00	73	511,7	2,0
14:31:45	76	532,8	2,1
14:32:30	79	553,8	2,2
14:33:20	83	581,8	2,3
14:34:00	87	609,9	2,4
14:34:50	90	630,9	2,5
14:35:40	93	651,9	2,6
14:36:25	96	673,0	2,7
14:37:10	100	701,0	2,8
14:38:00	104	729,0	2,9
14:38:50	107	750,1	3,0

Hora	Medida	Volumen	%
14:39:35	110	771,1	3,1
14:40:20	113	792,1	3,2
14:41:00	117	820,2	3,3
14:41:55	120	841,2	3,4
14:42:40	123	862,2	3,4
14:43:30	124	869,2	3,5
14:44:20	129	904,3	3,6
14:45:00	133	932,3	3,7
14:47:30	141	988,4	4,0
14:48:10	144	1009,4	4,0
14:49:00	146	1023,5	4,1
14:49:45	150	1051,5	4,2
14:50:30	152	1065,5	4,3
14:51:20	155	1086,6	4,3
14:52:05	157	1100,6	4,4
14:52:50	159	1114,6	4,5
14:53:30	162	1135,6	4,5
14:54:30	164	1149,6	4,6
14:55:30	167	1170,7	4,7
14:56:15	170	1191,7	4,8
14:57:00	172	1205,7	4,8
14:57:55	174	1219,7	4,9
14:58:20	176	1233,8	4,9
14:59:00	178	1247,8	5,0
15:01:30	185	1296,9	5,2
15:02:30	186	1303,9	5,2
15:03:05	188	1317,9	5,3
15:03:50	190	1331,9	5,3
15:04:35	192	1345,9	5,4
15:05:25	193	1352,9	5,4
15:06:10	195	1367,0	5,5
15:07:00	197	1381,0	5,5
15:07:45	198	1388,0	5,6
15:08:30	200	1402,0	5,6
15:09:20	201	1409,0	5,6
15:10:10	204	1430,0	5,7
15:10:55	205	1437,1	5,7

Hora	Medida	Volumen	%
15:11:40	207	1451,1	5,8
15:12:30	208	1458,1	5,8
15:13:15	210	1472,1	5,9
15:14:05	211	1479,1	5,9
15:14:50	212	1486,1	5,9
15:15:35	213	1493,1	6,0
15:16:25	215	1507,2	6,0
15:17:10	216	1514,2	6,1
15:17:55	217	1521,2	6,1
15:18:45	219	1535,2	6,1
15:19:30	221	1549,2	6,2
15:20:15	222	1556,2	6,2
15:21:00	223	1563,2	6,3
15:21:50	224	1570,2	6,3
15:22:40	225	1577,3	6,3
15:23:25	226	1584,3	6,3
15:24:10	227	1591,3	6,4
15:25:00	228	1598,3	6,4
15:25:45	229	1605,3	6,4
15:26:35	230	1612,3	6,4
15:27:25	231	1619,3	6,5
15:28:10	232	1626,3	6,5
15:28:50	233	1633,3	6,5
15:32:55	238	1668,4	6,7
15:36:05	242	1696,4	6,8
15:38:00	243	1703,4	6,8

Lluvias simuladas:

Plaza 6 (sección tipo BR): día 2.

Hora	Medida	Volumen	%
16:09:30	0	0,0	0,0
16:12:55	1	7,0	0,0
16:16:20	2	14,0	0,1
16:17:00	3	21,0	0,1
16:17:40	4	28,0	0,1
16:18:30	6	42,1	0,2
16:19:10	7	49,1	0,2
16:20:00	8	56,1	0,2
16:20:45	9	63,1	0,3
16:21:30	10	70,1	0,3
16:22:20	12	84,1	0,3
16:23:10	13	91,1	0,4
16:24:10	15	105,2	0,4
16:24:50	16	112,2	0,4
16:25:40	19	133,2	0,5
16:26:20	20	140,2	0,6
16:27:10	22	154,2	0,6
16:27:50	24	168,2	0,7
16:28:40	27	189,3	0,8
16:29:20	29	203,3	0,8
16:30:10	32	224,3	0,9
16:31:00	36	252,4	1,0
16:31:50	38	266,4	1,1
16:32:40	41	287,4	1,1
16:33:20	44	308,4	1,2
16:34:10	47	329,5	1,3
16:35:00	49	343,5	1,4
16:35:40	53	371,5	1,5
16:36:30	56	392,6	1,6
16:37:00	59	413,6	1,7
16:38:05	62	434,6	1,7
16:38:50	64	448,6	1,8
16:39:30	67	469,7	1,9
16:40:25	71	497,7	2,0
16:41:10	74	518,7	2,1
16:41:50	77	539,8	2,2
16:42:45	79	553,8	2,2

Hora	Medida	Volumen	%
16:43:40	82	574,8	2,3
16:44:20	86	602,9	2,4
16:45:05	88	616,9	2,5
16:45:50	91	637,9	2,6
16:46:40	94	658,9	2,6
16:47:30	96	673,0	2,7
16:48:10	99	694,0	2,8
16:49:00	103	722,0	2,9
16:49:50	106	743,1	3,0
16:50:40	108	757,1	3,0
16:51:40	111	778,1	3,1
16:52:30	114	799,1	3,2
16:53:20	116	813,2	3,3
16:55:45	125	876,3	3,5
16:57:15	131	918,3	3,7
16:58:35	137	960,4	3,8
17:00:00	142	995,4	4,0
17:02:55	149	1044,5	4,2
17:04:30	155	1086,6	4,3
17:06:00	160	1121,6	4,5
17:07:45	167	1170,7	4,7
17:09:45	173	1212,7	4,9
17:11:45	180	1261,8	5,0
17:13:45	185	1296,9	5,2
17:15:30	190	1331,9	5,3
17:22:30	210	1472,1	5,9
17:26:00	220	1542,2	6,2
17:28:40	226	1584,3	6,3
17:34:00	239	1675,4	6,7
17:39:00	250	1752,5	7,0
17:50:45	272	1906,7	7,6
17:58:50	286	2004,9	8,0

Lluvias simuladas:

Plaza 8 (sección tipo BA): día 1.

Hora	Medida	Volumen	%
14:17:25	0	0,0	0,0
14:19:35	1	7,1	0,0
14:20:20	8	56,7	0,2
14:21:05	50	354,5	1,4
14:21:50	118	836,6	3,3
14:22:40	194	1375,5	5,5
14:23:25	269	1907,2	7,6
14:24:15	342	2424,8	9,7
14:25:00	407	2885,6	11,5
14:25:45	469	3325,2	13,3
14:26:35	524	3715,2	14,9
14:27:20	572	4055,5	16,2
14:28:10	615	4360,4	17,4
14:28:55	653	4629,8	18,5
14:29:40	687	4870,8	19,5
14:30:30	717	5083,5	20,3
14:31:50	745	5282,1	21,1
14:32:25	770	5459,3	21,8
14:32:50	794	5629,5	22,5
14:33:40	816	5785,4	23,1
14:34:20	835	5920,2	23,7
14:35:15	851	6033,6	24,1
14:36:00	868	6154,1	24,6
14:36:45	883	6260,5	25,0
14:37:30	896	6352,6	25,4
14:38:20	909	6444,8	25,8
14:39:05	921	6529,9	26,1
14:39:25	934	6622,1	26,5
14:40:40	945	6700,1	26,8
14:41:30	956	6778,0	27,1
14:42:15	965	6841,9	27,4
14:43:00	975	6912,8	27,7
14:43:50	983	6969,5	27,9
14:44:40	992	7033,3	28,1
14:47:00	1015	7196,4	28,8
14:47:40	1023	7253,1	29,0
14:48:30	1031	7309,8	29,2

Hora	Medida	Volumen	%
14:49:15	1038	7359,4	29,4
14:50:05	1046	7416,1	29,7
14:50:50	1053	7465,8	29,9
14:51:35	1060	7515,4	30,1
14:52:25	1067	7565,0	30,3
14:53:10	1073	7607,6	30,4
14:54:00	1080	7657,2	30,6
14:54:50	1087	7706,8	30,8
14:55:45	1093	7749,4	31,0
14:56:30	1100	7799,0	31,2
14:57:15	1106	7841,5	31,4
14:57:55	1111	7877,0	31,5
14:58:40	1118	7926,6	31,7
14:59:25	1123	7962,1	31,8
15:00:15	1129	8004,6	32,0
15:01:00	1134	8040,1	32,2
15:01:50	1139	8075,5	32,3
15:02:40	1145	8118,1	32,5
15:03:20	1150	8153,5	32,6
15:04:10	1155	8189,0	32,8
15:04:55	1160	8224,4	32,9
15:05:45	1165	8259,9	33,0
15:06:30	1169	8288,2	33,2
15:07:20	1175	8330,8	33,3
15:08:05	1179	8359,1	33,4
15:08:50	1183	8387,5	33,5
15:09:40	1188	8422,9	33,7
15:10:30	1192	8451,3	33,8
15:11:15	1196	8479,6	33,9
15:12:00	1200	8508,0	34,0
15:12:50	1205	8543,5	34,2
15:13:35	1208	8564,7	34,3
15:14:20	1212	8593,1	34,4
15:15:10	1215	8614,4	34,5
15:15:55	1220	8649,8	34,6
15:16:45	1223	8671,1	34,7
15:17:30	1227	8699,4	34,8

Hora	Medida	Volumen	%
15:18:15	1230	8720,7	34,9
15:19:05	1233	8742,0	35,0
15:19:50	1237	8770,3	35,1
15:20:25	1241	8798,7	35,2
15:21:25	1244	8820,0	35,3
15:22:10	1247	8841,2	35,4
15:22:55	1250	8862,5	35,5
15:23:45	1254	8890,9	35,6
15:24:30	1257	8912,1	35,6
15:25:20	1260	8933,4	35,7
15:26:10	1263	8954,7	35,8
15:26:50	1266	8975,9	35,9
15:27:40	1270	9004,3	36,0
15:28:30	1273	9025,6	36,1
15:29:15	1275	9039,8	36,2
15:33:10	1290	9146,1	36,6
15:36:20	1300	9217,0	36,9
15:43:25	1321	9365,9	37,5

Lluvias simuladas:

Plaza 8 (sección tipo BA): día 2.

Hora	Medida	Volumen	%
16:10:40	0	0,0	0,0
16:10:45	1	7,1	0,0
16:11:00	2	14,2	0,1
16:11:45	3	21,3	0,1
16:13:20	23	163,1	0,7
16:14:10	88	623,9	2,5
16:14:55	173	1226,6	4,9
16:15:40	260	1843,4	7,4
16:16:30	344	2439,0	9,8
16:17:15	421	2984,9	11,9
16:18:05	493	3495,4	14,0
16:19:05	556	3942,0	15,8
16:19:50	610	4324,9	17,3
16:20:30	658	4665,2	18,7
16:21:10	694	4920,5	19,7
16:22:00	736	5218,2	20,9
16:22:45	768	5445,1	21,8
16:23:40	797	5650,7	22,6
16:24:20	822	5828,0	23,3
16:25:05	846	5998,1	24,0
16:25:50	868	6154,1	24,6
16:26:40	888	6295,9	25,2
16:27:25	905	6416,5	25,7
16:28:15	921	6529,9	26,1
16:29:00	937	6643,3	26,6
16:29:45	950	6735,5	26,9
16:30:35	964	6834,8	27,3
16:31:25	977	6926,9	27,7
16:32:10	989	7012,0	28,0
16:33:00	1000	7090,0	28,4
16:33:44	1012	7175,1	28,7
16:34:35	1022	7246,0	29,0
16:35:15	1032	7316,9	29,3
16:36:05	1043	7394,9	29,6
16:36:50	1052	7458,7	29,8
16:37:40	1060	7515,4	30,1
16:38:25	1069	7579,2	30,3

Hora	Medida	Volumen	%
16:39:10	1078	7643,0	30,6
16:40:00	1086	7699,7	30,8
16:40:45	1094	7756,5	31,0
16:41:30	1102	7813,2	31,3
16:42:20	1109	7862,8	31,5
16:43:10	1117	7919,5	31,7
16:43:50	1123	7962,1	31,8
16:44:40	1130	8011,7	32,0
16:45:30	1136	8054,2	32,2
16:46:15	1143	8103,9	32,4
16:47:05	1149	8146,4	32,6
16:47:50	1156	8196,0	32,8
16:48:35	1161	8231,5	32,9
16:49:20	1166	8266,9	33,1
16:50:10	1173	8316,6	33,3
16:51:00	1178	8352,0	33,4
16:52:00	1183	8387,5	33,5
16:52:50	1189	8430,0	33,7
16:55:40	1209	8571,8	34,3
16:56:30	1213	8600,2	34,4
16:58:00	1223	8671,1	34,7
16:59:45	1233	8742,0	35,0
17:02:20	1245	8827,1	35,3
17:03:50	1253	8883,8	35,5
17:05:20	1261	8940,5	35,8
17:07:00	1269	8997,2	36,0
17:09:00	1281	9082,3	36,3
17:11:00	1287	9124,8	36,5
17:13:00	1298	9202,8	36,8
17:15:45	1307	9266,6	37,1
17:21:45	1331	9436,8	37,7
17:25:30	1343	9521,9	38,1
17:28:00	1351	9578,6	38,3
17:33:25	1368	9699,1	38,8
17:38:15	1382	9798,4	39,2
17:50:00	1411	10004,0	40,0
17:58:20	1431	10145,8	40,6

Lluvias simuladas:

Plaza 8 (sección tipo BA): día 3.

Hora	Medida	Volumen	%
11:12:30	0	0,0	0,0
11:15:25	26	184,3	0,7
11:16:05	76	538,8	2,2
11:16:55	145	1028,1	4,1
11:17:40	219	1552,7	6,2
11:18:30	292	2070,3	8,3
11:19:15	357	2531,1	10,1
11:20:05	415	2942,4	11,8
11:20:55	466	3303,9	13,2
11:21:35	510	3615,9	14,5
11:22:25	549	3892,4	15,6
11:23:10	584	4140,6	16,6
11:23:55	614	4353,3	17,4
11:24:45	642	4551,8	18,2
11:25:30	665	4714,9	18,9
11:27:40	707	5012,6	20,1
11:29:00	742	5260,8	21,0
11:30:00	756	5360,0	21,4
11:31:20	783	5551,5	22,2
11:34:00	815	5778,4	23,1
11:35:10	833	5906,0	23,6
11:39:35	879	6232,1	24,9
11:40:30	885	6274,7	25,1
11:43:45	908	6437,7	25,8
11:47:05	928	6579,5	26,3
11:50:45	949	6728,4	26,9
11:54:00	962	6820,6	27,3
12:01:45	986	6990,7	28,0
12:08:00	1002	7104,2	28,4
12:10:50	1007	7139,6	28,6
12:34:20	1045	7409,1	29,6
12:42:40	1054	7472,9	29,9
12:50:30	1060	7515,4	30,1

Lluvias simuladas:

Plaza 12 (sección tipo PA): día 2.

Hora	Medida	Volumen	%
16:32:20	0	0,0	0,0
16:33:30	4	28,7	0,1
16:34:30	69	494,7	2,0
16:34:55	101	724,2	2,9
16:35:40	126	903,4	3,6
16:36:25	148	1061,2	4,2
16:37:10	166	1190,2	4,8
16:38:00	182	1304,9	5,2
16:38:45	194	1391,0	5,6
16:39:35	203	1455,5	5,8
16:40:20	209	1498,5	6,0
16:41:15	213	1527,2	6,1
16:41:55	216	1548,7	6,2
16:42:40	219	1570,2	6,3
16:43:30	220	1577,4	6,3
16:45:10	221	1584,6	6,3
16:55:10	221	1584,6	6,3

Lluvias simuladas:

Plaza 12 (sección tipo PA): día 3.

Hora	Medida	Volumen	%
13:12:00	0	0,0	0,0
13:15:10	28	198,5	0,8
13:16:05	73	517,6	2,1
13:16:45	108	765,7	3,1
13:17:35	135	957,2	3,8
13:18:25	155	1099,0	4,4
13:19:05	162	1148,6	4,6
13:21:15	162	1148,6	4,6
13:41:30	162	1148,6	4,6

Lluvias simuladas:

Plaza 14 (sección tipo PR): día 1.

Hora	Medida	Volumen	%
14:40:55	0	0,0	0,0
14:47:40	12	91,3	0,4
14:49:00	37	281,6	1,1
14:49:55	86	654,5	2,6
14:50:35	154	1171,9	4,7
14:51:10	217	1651,4	6,6
14:51:55	275	2092,8	8,4
14:52:50	321	2442,8	9,8
14:53:30	361	2747,2	11,0
14:54:20	397	3021,2	12,1
14:55:25	427	3249,5	13,0
14:56:00	455	3462,6	13,9
14:56:40	481	3660,4	14,6
14:57:35	508	3865,9	15,5
14:58:10	534	4063,7	16,3
14:58:55	559	4254,0	17,0
14:59:35	583	4436,6	17,7
15:00:25	607	4619,3	18,5
15:01:15	630	4794,3	19,2
15:02:05	650	4946,5	19,8
15:02:55	667	5075,9	20,3
15:05:05	713	5425,9	21,7
15:06:43	751	5715,1	22,9
15:07:35	768	5844,5	23,4
15:08:15	781	5943,4	23,8
15:09:20	796	6057,6	24,2
15:10:50	820	6240,2	25,0
15:11:50	830	6316,3	25,3
15:12:50	847	6445,7	25,8
15:15:00	862	6559,8	26,2
15:16:00	875	6658,8	26,6
15:17:00	882	6712,0	26,8
15:18:00	887	6750,1	27,0
15:20:40	909	6917,5	27,7
15:22:25	917	6978,4	27,9
15:23:35	921	7008,8	28,0
15:26:00	933	7100,1	28,4

Hora	Medida	Volumen	%
15:27:10	940	7153,4	28,6
15:29:50	948	7214,3	28,9
15:31:15	953	7252,3	29,0
15:32:15	955	7267,6	29,1
15:35:10	966	7351,3	29,4
15:36:00	968	7366,5	29,5
15:39:20	977	7435,0	29,7
15:41:20	983	7480,6	29,9
15:43:40	988	7518,7	30,1
15:45:40	994	7564,3	30,3

Lluvias simuladas:

Plaza 14 (sección tipo PR): día 2.

Hora	Medida	Volumen	%
16:32:00	0	0,0	0,0
16:35:50	2	15,2	0,1
16:36:35	31	235,9	0,9
16:37:10	89	677,3	2,7
16:38:10	194	1476,3	5,9
16:38:40	288	2191,7	8,8
16:39:35	398	3028,8	12,1
16:40:20	472	3591,9	14,4
16:41:15	544	4139,8	16,6
16:41:55	606	4611,7	18,4
16:42:40	658	5007,4	20,0
16:43:20	704	5357,4	21,4
16:44:10	743	5654,2	22,6
16:45:00	777	5913,0	23,7
16:45:45	807	6141,3	24,6
16:46:30	835	6354,4	25,4
16:47:20	862	6559,8	26,2
16:48:20	887	6750,1	27,0
16:49:05	914	6955,5	27,8
16:49:40	938	7138,2	28,6
16:50:25	964	7336,0	29,3
16:51:10	987	7511,1	30,0
16:52:10	1012	7701,3	30,8
16:53:00	1035	7876,4	31,5
16:53:40	1057	8043,8	32,2
16:54:20	1078	8203,6	32,8
16:55:10	1098	8355,8	33,4
16:56:00	1117	8500,4	34,0
16:56:40	1135	8637,4	34,5
16:57:40	1152	8766,7	35,1
16:58:35	1164	8858,0	35,4
16:59:45	1189	9048,3	36,2
17:01:20	1211	9215,7	36,9
17:03:00	1230	9360,3	37,4
17:05:35	1254	9542,9	38,2
17:07:00	1267	9641,9	38,6
17:08:30	1279	9733,2	38,9

Hora	Medida	Volumen	%
17:10:00	1291	9824,5	39,3
17:12:00	1302	9908,2	39,6
17:14:00	1317	10022,4	40,1
17:16:00	1327	10098,5	40,4
17:18:00	1339	10189,8	40,8
17:24:30	1371	10433,3	41,7
17:28:30	1390	10577,9	42,3
17:31:00	1399	10646,4	42,6
17:36:30	1420	10806,2	43,2
17:41:20	1441	10966,0	43,9
17:53:00	1475	11224,8	44,9
18:01:30	1494	11369,3	45,5

Lluvias simuladas:

Plaza 14 (sección tipo PR): día 3.

Hora	Medida	Volumen	%
11:36:00	0	0,0	0,0
11:40:00	4	30,4	0,1
11:40:50	25	190,3	0,8
11:41:30	54	410,9	1,6
11:42:20	106	806,7	3,2
11:43:05	167	1270,9	5,1
11:43:55	227	1727,5	6,9
11:44:45	282	2146,0	8,6
11:45:30	329	2503,7	10,0
11:46:15	370	2815,7	11,3
11:47:00	407	3097,3	12,4
11:47:50	438	3333,2	13,3
11:48:40	467	3553,9	14,2
11:49:25	496	3774,6	15,1
11:50:25	523	3980,0	15,9
11:51:05	549	4177,9	16,7
11:51:55	576	4383,4	17,5
11:52:35	602	4581,2	18,3
11:53:15	626	4763,9	19,1
11:54:05	652	4961,7	19,8
11:55:00	676	5144,4	20,6
11:55:45	699	5319,4	21,3
11:56:30	723	5502,0	22,0
11:57:15	745	5669,5	22,7
11:58:00	766	5829,3	23,3
11:58:45	786	5981,5	23,9
11:59:40	805	6126,1	24,5
12:01:00	815	6202,2	24,8
12:02:25	845	6430,5	25,7
12:03:40	870	6620,7	26,5
12:04:30	880	6696,8	26,8
12:05:05	889	6765,3	27,1
12:06:10	897	6826,2	27,3
12:08:30	918	6986,0	27,9
12:10:45	934	7107,7	28,4
12:14:05	951	7237,1	28,9
12:15:20	959	7298,0	29,2

Hora	Medida	Volumen	%
12:38:50	1031	7845,9	31,4
12:45:55	1045	7952,5	31,8
12:53:50	1058	8051,4	32,2
12:56:10	1062	8081,8	32,3
13:06:30	1075	8180,8	32,7
13:18:05	1085	8256,9	33,0

