

JUNIO DE 2021

PROYECTO TÉCNICO

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFILTRACIÓN Y COLMATACIÓN DE PAVIMENTOS
PERMEABLES UTILIZANDO UN SIMULADOR DE LLUVIA**

EXPERIMENTAL STUDY OF INFILTRATION AND CLOGGING OF PERMEABLE PAVEMENTS USING A RAINFALL SIMULATOR



MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

AUTOR: DAMIÁN PAZOS TABOADA

TUTOR: JOSÉ ANTA ÁLVAREZ



Agradecimientos

La primera persona a la que debo dar las gracias es a mi tutor José Anta. Sin su ayuda y su apoyo nunca habría siquiera comenzado con este Proyecto Técnico, ya que, a lo largo de los meses que ha durado esta investigación, siempre ha estado ahí para aconsejarme con las dudas y problemas que iban surgiendo. Sin su guía y sin todas sus aportaciones no habría podido realizarse un trabajo del nivel que se ha hecho y con el que he aprendido tanto.

También es muy importante agradecer a Juan Naves toda su ayuda durante estos meses. Siempre ha estado en todo momento ayudándome en el trabajo experimental y de investigación de una manera muy cercana día a día sin poner ninguna pega a pesar de los errores causados por la inexperiencia que pudiera haber ido teniendo. Ha sido el compañero ideal para todas las tareas derivadas de este Proyecto y sin el cual no podría haberse llevado a cabo. Siguiendo con esta línea, tengo que dar las gracias a todos los técnicos del CITEEC, a Dani, Esteban, Gonzalo, José y Miguel por su ayuda con cualquier problema que nos surgiera y por su dedicación con el trabajo del Laboratorio de Hidráulica del CITEEC.

Al GEAMA también le tengo que dar las gracias, por permitirme formar parte durante este periodo de un grupo de investigación tan competente y profesional, sobre todo al Equipo del proyecto POREDRAIN y a Joaquín Suárez en particular, por todo su apoyo, dedicación y por todas las aportaciones que han servido para poder realizar este Proyecto Técnico. Además, agradezco a la Fundación de la Ingeniería Civil financiar parte de mi trabajo durante estos meses y a las empresas Pavimentos de Tudela, Hidrostant y AH Asociados por haber financiado el grueso en el que se basa la principal investigación de este Proyecto Técnico a través del convenio “CARACTERIZACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE Y DE LOS FENÓMENOS DE RETENCIÓN DE PARTÍCULAS DEL SISTEMA DRY PAVING SYSTEM” (Ref: INV13320), gestionado a través de la Fundación Universidade da Coruña. También agradezco al resto de personas que de una forma más indirecta me han estado apoyando, animando y echando una mano y siguen por la Escuela investigando en otras líneas como Esteban Sañudo y Gonzalo García-Alén.

Finalmente, doy las gracias a todos mis amigos y amigas que me han ayudado a no desanimarme y a seguir trabajando durante la duración de este Proyecto. Y como no podía ser de otra manera, doy las gracias a mis padres y a mis tres hermanas sin los cuales no podría haber llegado hasta aquí después de todos estos años estudiando en la Escuela.



Resumen

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) están constituidos por una serie de técnicas y métodos que buscan una manera de solucionar los problemas derivados de la impermeabilización del suelo que se viene produciendo en las últimas décadas en los entornos urbanos. En los últimos años, en España, se han ido desarrollando estos sistemas con cada vez más frecuencia, pudiéndose observar y comprobar su buen funcionamiento para imitar el ciclo hidrológico natural del agua a través de su infiltración al terreno, su evapotranspiración, su almacenamiento, etc. De este modo los SUDS pretenden ser una forma complementaria de gestionar el agua en las metrópolis frente a las técnicas tradicionales de drenaje urbano.

En este contexto, se inicia una línea de investigación que pretende estudiar el comportamiento de un tipo de técnica SUDS en particular. Este se corresponde con unas losas permeables con juntas en las que se trata de evaluar su comportamiento frente a pavimentos impermeables tradicionales y su funcionamiento hidráulico frente a la acumulación de sedimentos de diferentes granulometrías. En concreto, este Proyecto Técnico pretende hacer un análisis del funcionamiento hidráulico y del rendimiento a la hora de eliminar una serie de contaminantes acumulados en las losas de hormigón permeable.

Para ello, se realiza un montaje experimental del simulador de lluvia que servirá de plataforma de ensayos durante la duración de este Proyecto. A continuación, se comprueba el buen funcionamiento de dicho simulador y de los materiales que se vayan a usar a lo largo de los ensayos. Posteriormente, se procede a analizar el comportamiento hidráulico de una superficie impermeable y a compararlo con la caracterización hidráulica de los paquetes de losas sin sedimentos. El siguiente paso es inducir la colmatación de los poros mediante el vertido de dos granulometrías diferentes de sedimento, para llevar a cabo una ulterior limpieza mediante un aspirado superficial del firme. Finalmente, se realiza un balance de masas para poder dilucidar la cantidad de sedimento que permanece retenido en los poros de las losas.

Los resultados señalan que, a nivel hidráulico, la colmatación con los sedimentos utilizados no produce efectos significativos en los hidrogramas. En cuanto a la permeabilidad sí que se produce un descenso de la capacidad filtradora de los firmes utilizados, que se puede recuperar en cierto grado con un aspirado o limpieza superficial.



Resumo

Os Sistemas de Drenaxe Urbana Sostible (SUDS) están constituídos por unha serie de técnicas e métodos que buscan unha maneira de resolver os problemas derivados da impermeabilización do solo que se está a producir nas últimas décadas nos ambientes urbanos. Nos últimos anos estes sistemas desenvolvéronse con cada vez máis frecuencia en España, poidéndose observar e verificar o seu bo funcionamento para imitar o ciclo hidrolóxico natural da auga e lograr un mellor comportamento da auga de choiva a través da súa infiltración no terreo, súa evapotranspiración, seu almacenamento, etc. Deste xeito, os SUDS pretenden ser unha forma complementaria de xestionar a auga nas metrópoles en comparación coas técnicas tradicionais de drenaxe urbana.

Neste contexto, comeza unha liña de investigación que ten como obxectivo estudar o comportamento dun determinado tipo de técnica SUDS. Este correspóndese con lousas permeables con xuntas nas que se trata de avaliar o seu comportamento fronte aos pavimentos impermeables tradicionais e o seu rendemento hidráulico fronte a unha acumulación de sedimentos de diferentes granulometrías. En concreto, este Proxecto Técnico pretende facer unha análise do funcionamento e o rendemento hidráulico ao eliminar unha serie de contaminantes acumulados en lousas de formigón permeables.

Para elo, realízase unha montaxe experimental do simulador de choiva que servirá de plataforma de proba durante a duración deste Proxecto. A continuación, compróbase o bo funcionamento do dito simulador e dos materiais que se utilizarán ao longo das probas. Posteriormente, procédese a analizar o comportamento hidráulico dunha superficie impermeable e a comparalo coa carectización hidráulica dos paquetes de lousas sen sedimentos. O seguinte paso é inducir a obstrución dos poros botando dúas granulometrías diferentes de sedimento, para realizar unha limpeza posterior succionando a superficie. Finalmente, lévase a cabo un balance de masas para poder dilucidar a cantidade de sedimento que queda retido nos poros das lousas.

Os resultados indican que, a nivel hidráulico, a obstrución cos sedimentos empregados non produce efectos significativos nos hidrógramas. En canto á permeabilidade, si que hai unha diminución da capacidade infiltrativa dos pavimentos empregados, que se pode recuperar ata certo punto cunha aspiración ou limpeza superficial.



Abstract

Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) consists of a series of techniques and designed to solve the problems derived from the urban catchment soilsealing that has been occurring in recent decades. In the last few years, in Spain, SUDS have been increasingly implemented and evaluated in terms of mimic the natural catchment hydrology by infiltration, evapotranspiration and water detention processes. Thus, SUDS are intended to be a complementary way of managing water in metropolises compared to traditional urban drainage techniques.

In this context, this research thesis begins a research topic that aims to study the behaviour of a particular type of technique SUDS. Permeable pavers with joints have been analysed and compared with impervious surfaces in terms of their hydraulic performance against sediment clogging. Specifically, it pretends to make an analysis of hydraulic and sediment removal efficiency using deposited sediments with different granulometries.

To achieve this, a rainfall simulator was built and tested. Subsequently, the hydraulic behaviour of an impermeable surface is analysed and compared with the hydraulic characterization of the permeable pavers without sediment. Following, road deposited sediments with two different granulometries were tested in the pavers to determine the permeability of the slabs after clogging. Finally, a mass balance was performed to elucidate the amount of sediment that remains retained in the pores of the permeable slabs.

The results indicate that clogging does not affect to the recorded hydrographs with the rainfall simulator. Regarding the permeability, there is a decrease in the infiltration capacity of the pavements used, which can be recovered to a certain degree with a vacuum or superficial cleaning.



Estudio experimental de la Infiltración y Colmatación de
Pavimentos Permeables utilizando un Simulador de
Lluvia





Índice

1	Introducción	1
2	Estado del arte	2
2.1	Introducción	2
2.2	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	2
2.2.1	Introducción	2
2.2.2	Implementación en España	4
2.2.3	Tipologías de SUDS	5
2.3	Pavimentos permeables de hormigón poroso	6
2.3.1	Introducción	6
2.3.2	Colmatación y pérdida de la capacidad de filtración	8
2.3.3	Limpieza y mantenimiento	8
2.3.4	Durabilidad y vida útil	9
2.3.5	Investigación e implementación	9
3	Objetivos	15
4	Metodología	16
4.1	Montaje experimental	16
4.1.1	Módulo de ensayos	16
4.1.2	Paquetes de firme	19
4.1.3	Determinación de niveles y caudales	20
4.1.4	Determinación de permeabilidad de las losas	21
4.2	Caracterización hidrológica con losas sin sedimento	24
4.2.1	Uniformidad de la lluvia	24
4.2.2	Comportamiento hidráulico	25
4.3	Caracterización de la retención y la colmatación del Dry Paving System	27
5	Resultados	31
5.1	Caracterización del módulo de ensayos	31
5.1.1	Uniformidad de la lluvia	31
5.1.2	Calibración de sensores y determinación de caudales	31
5.2	Caracterización hidrológica con losas sin sedimento	33
5.3	Caracterización de la retención y la colmatación del Dry Paving System	35
5.3.1	Reducción de la capacidad de infiltración	35
5.3.2	Efecto de la limpieza	38
5.3.3	Análisis de la permeabilidad	39
5.3.4	Balance de masas	43



Estudio experimental de la Infiltración y Colmatación de Pavimentos Permeables utilizando un Simulador de Lluvia



6	Conclusiones y líneas de investigación futuras	46
	Bibliografía	48
	Anejo	53



1 Introducción

En las últimas décadas, y a lo largo de todo el mundo, se ha ido produciendo un gran flujo de población desde el medio rural hasta el medio urbano que aún continúa llevándose a cabo actualmente en muchos países en vías de desarrollo. Esto ha dado lugar a un auge y crecimiento de las ciudades, lo que ha implicado una expansión de las zonas pavimentadas, creándose infraestructuras viarias impermeables que interrumpen el ciclo natural del agua impidiendo su correcta y habitual infiltración al terreno. Esto conlleva un aumento de la escorrentía urbana y, en muchos casos, un mal funcionamiento de los sistemas de alcantarillado que no se han diseñado para soportar las inundaciones derivadas de las aguas pluviales de alta intensidad. Además, también se produce una degradación de las masas acuáticas a causa de la polución resultante de la actividad urbana que arrastran estas aguas de escorrentía. Toda esta situación es previsible que empeore como consecuencia del cambio climático y del continuo aumento de las ciudades, por lo que se puede entender que es necesaria una adecuada gestión de la escorrentía urbana para el mantenimiento del buen estado de las masas de agua superficial.

En la actualidad se están desarrollando nuevos sistemas y metodologías para limitar y mitigar esta impermeabilización del suelo y es, en este contexto, donde surgen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales intentan imitar el ciclo hidrológico natural del agua, permitiendo su infiltración, almacenamiento y evapotranspiración y reduciendo la contaminación movilizada hacia el medio natural. Así, los SUDS suponen una alternativa que complementa a los sistemas tradicionales de drenaje y que permite afrontar el diseño y gestión de las aguas pluviales dando importancia tanto a los fenómenos medioambientales y sociales como a los hidrológicos e hidráulicos.

Entre los diferentes tipos de SUDS que existen hay que destacar el papel de los pavimentos permeables. Estos poseen una gran capacidad de reducir los caudales punta y los volúmenes de escorrentía. También es destacable su alta capacidad de almacenamiento, produciendo una retención que, por una parte, es favorable, pues actúa como filtro ante una contaminación que de otro modo iría al terreno, pero que, por otra parte, es problemática al dar lugar a la colmatación de sus poros. Este es el mayor contratiempo que presentan este tipo de pavimentos, ya que su elevado porcentaje de porosidad los convierte en firmes muy susceptibles a obstruirse a causa de los residuos acumulados en la superficie y en la estructura de sus poros, lo que merma su capacidad filtrante, con lo que pueden llegar a perder su utilidad.

A pesar de que en los últimos años ha aumentado la investigación sobre los pavimentos permeables, todavía quedan muchos aspectos por dilucidar en relación a cómo afectan sobre ellos las diferentes intensidades de lluvia, las diversas deposiciones de los contaminantes antes y después de ser transportados por el agua, etc. Por lo tanto, estudiar cómo se comportan estos pavimentos frente a la colmatación es muy relevante para poder demostrar la eficacia de este tipo de SUDS y para poder conocer la utilidad de su implementación en entornos urbanos.



2 Estado del arte

2.1 Introducción

Con la proliferación de las ciudades y el aumento de los entornos urbanos comenzó a requerirse un desarrollo de ciertos sistemas de saneamiento que solucionasen el principal problema de tratamiento de aguas residuales existentes derivadas de la actividad humana. De este modo se tuvieron que desarrollar unas infraestructuras que conllevaron un proceso de canalización de estas aguas residuales. Así proliferaron en las ciudades los sistemas de colectores que constituyen la base de los sistemas tradicionales de drenaje urbano y que también buscaban evacuar lo más rápido posible las lluvias generadas hacia el medio receptor (Puertas et al, 2008).

Con la canalización de la escorrentía atajada surge aun así otro problema. Este es el relativo a la calidad de dichas escorrentías filtradas y al efecto perjudicial que pueden tener estos vertidos en el medio natural. A pesar de que este es un problema conocido y estudiado, tiene graves implicaciones ya que se produce un lavado de los contaminantes depositados en tiempo seco. Esto sucede en los sistemas tradicionales actuales, sobre todo si el sistema de drenaje está formado por una red unitaria. Así, se ha dado lugar a sistemas infradimensionados, que no son capaces de hacer frente a posibles inundaciones, sobre todo en zonas con frecuencia de lluvias torrenciales. Además, puedes verse afectada la calidad de las aguas debido a la contaminación difusa generada por la actividad humana y a los vertidos que produce la saturación de las depuradoras.

Toda esta problemática se ve acrecentada a medida que aumenta el tamaño de las ciudades y, por ende, se produce un crecimiento de las áreas impermeables que provocan una interrupción del ciclo natural hidrológico del agua. Esta impermeabilización conlleva una reducción de los espacios verdes y afecta a la intercepción natural y a la evapotranspiración, disminuyendo la infiltración al terreno y provocando mayores volúmenes de escorrentía que pueden inducir a un aumento de las inundaciones. Además, al aumentar la escorrentía se produce también un aumento de la contaminación vertida al medio receptor que puede provocar caídas del oxígeno disuelto, incremento de las concentraciones de nutrientes, contaminación por agentes patógenos o acumulación de elementos tóxicos (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007).

Con todo lo explicado, se puede entender el principal reto, en materia de drenaje, al que se enfrentan las urbes actuales y del futuro. Al principio de la concepción de los sistemas de drenaje el principal problema era el tratamiento de las aguas residuales, pero actualmente el mayor contratiempo existente en las ciudades es el aumento de las inundaciones y de los contaminantes vertidos al medio acrecentados por la impermeabilización del suelo urbano.

2.2 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

2.2.1 Introducción

En la actualidad, se ha convertido en una imperiosa necesidad afrontar una forma diferente de tratar las aguas pluviales. Es en este contexto donde surge un complemento a los sistemas convencionales ya descritos. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) pretenden reproducir el ciclo hidrológico natural del agua que se ha visto interrumpido debido a la



impermeabilización del suelo urbano. Para ello, estas técnicas, pretenden minimizar el impacto que ha producido el desarrollo urbanístico de las últimas décadas, reducir la cantidad de escorrentía vertida al medio y mejorar su calidad reduciendo los contaminantes que contenga. De esta forma, los SUDS abarcan un conjunto de medidas que permiten una gestión de las aguas pluviales complementaria a la tradicional haciendo hincapié en los aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales y que se centran en cuatro pilares de diseño fundamentales (Woods-Ballard et al., 2015):

1. Cantidad de agua: controlar la cantidad de escorrentía para apoyar la gestión del riesgo de inundaciones y mantener y proteger el ciclo natural del agua.
2. Calidad del agua: gestionar la calidad de la escorrentía para prevenir la contaminación.
3. Usos recreativos: crear y mantener mejores lugares para las personas.
4. Biodiversidad: crear y mantener mejores lugares para la naturaleza.

La utilidad de este tipo de sistemas no solo atañe a problemáticas en tiempo de lluvia, sino que los SUDS son ventajosos también en tiempo seco. En este aspecto es de especial interés el posible aprovechamiento, con un previo tratamiento, de las aguas provenientes de las cubiertas o tejados de viviendas y de diferentes edificaciones urbanas. Estas aguas podrían emplearse en usos que no necesiten de los estándares de calidad del agua potable, como por ejemplo en cisternas de inodoros o sistemas de riego.

Con estas definiciones se puede entrever la finalidad de estos sistemas, la cual se podría resumir en una serie de objetivos (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007):

1. Velar por la no interrupción del ciclo hidrológico natural del agua aumentando las zonas permeables.
2. Integrar el tratamiento de las diferentes aguas vertidas al medio en los entornos urbanos, así como su reutilización.
3. Reducir los contaminantes acumulados en dichas masas de agua para mejorar su calidad.
4. Disminuir los caudales punta y los volúmenes totales vertidos al medio, con lo que se podrían evitar posibles inundaciones y saturaciones de las estaciones depuradoras con su consiguiente reducción de costes.

Por lo tanto, aunque los SUDS ayudan al saneamiento de las urbes siendo parte de un enfoque de gestión integral, todavía existen ciertos retos que afrontar como son el aumentar su implementación para poder corroborar su eficiencia económica frente a sistemas tradicionales (ver Tabla 1). Además, esta proliferación también podrá permitir conocer la duración de los SUDS en contraposición a los sistemas de colectores y permitirá establecer unas pautas comunes a la hora de su diseño.



Tabla 1. Comparación entre Sistemas convencionales y SUDS (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007)

	Sistema convencional Colectores	Sistema alternativo SUDS
Coste de construcción	Pueden ser equivalentes, aunque los usos indirectos de los SUDS reducen su coste real	
Coste de operación y mantenimiento	Establecido	No establecido: falta experiencia
Control de inundaciones en la propia cuenca	Sí	Sí
Control de inundaciones aguas abajo	No	Sí
Reutilización	No	Sí
Recarga/Infiltración	No	Sí
Eliminación de contaminantes	Baja	Alta
Beneficios en servicios al ciudadano	No	Sí
Beneficios educacionales	No	Sí
Vida útil	Establecida	No establecida: falta experiencia
Requerimientos de espacio	Insignificantes	Dependiendo del sistema: pueden ser importantes
Criterios de diseño	Establecidos	No establecidos: falta experiencia

2.2.2 Implementación en España

Los SUDS han tenido una lenta implementación en España. De hecho, fue en 1993 cuando se empezó a usar el concepto de drenaje sostenible dentro del Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) de la Universidad de Cantabria dando lugar al primer trabajo de fin de máster de esta temática en España (Cervigni, 1993). Aun así, el propio concepto de SUDS comenzó a extenderse en el país en 2003 con una colaboración entre la Universidad de Coventry y la Universidad de Cantabria que daría lugar al primer proyecto donde se implementarían estos sistemas, el proyecto FIDICA.

A partir del inicio del milenio, con la llegada del concepto de SUDS mencionado comenzó a expandirse poco a poco la investigación de estas técnicas con su foco principal las universidades. En este aspecto cabe destacar la labor realizada por Anta et al. (2008) en el libro de Gestión de las Aguas Pluviales que constituye un sólido manual en el que se presentan los diferentes tipos de SUDS más extendidos globalmente y en el que se expone cómo afrontar su diseño.

En estos años la legislación también fue cambiando, pero siempre con cierto desfase respecto a países como Estados Unidos y Reino Unido que ya habían comenzado a experimentar con SUDS dos décadas atrás (Castro-Fresno et al., 2013). Actualmente, y con el acelerón provocado por la entrada en la Unión Europea, la legislación española contempla y regula conceptos como la regeneración del agua, el control de inundaciones, la gestión de aguas pluviales, etc.

A pesar de este rápido desarrollo mencionado, en España sigue habiendo una escasa implantación de SUDS en comparación con otros países del entorno y aún siguen existiendo muchos problemas que solucionar derivados del infradimensionamiento de los sistemas



tradicionales de drenaje urbano. Uno de estos problemas es debido a la idiosincrasia del clima ibérico que posee grandes diferencias entre la zona mediterránea y la atlántica y que, aunque han sido estudiados en ciertas ocasiones (Andrés-Doménech et al., 2021), siguen siendo conflictivos. También existen muchas otras barreras de entrada a la implementación de estos sistemas en España, las cuales pueden ir desde impedimentos sociales, normativos o técnicos (Andrés-Doménech et al., 2021) y entre los que destacan la baja participación de la comunidad, las responsabilidades aisladas, la falta de difusión de información técnica, el descoordinado marco institucional, los límites normativos, la falta de voluntad política, los insuficientes recursos, la falta de seguimiento y evaluación o la poca disposición con respecto a la eficiencia e implementación a largo plazo.

2.2.3 Tipologías de SUDS

Existen diversas divisiones en las que se categorizan a los SUDS, pero dos de las más extendidas mundialmente son separarlos en medidas no estructurales y medidas estructurales. Las primeras son aquellas que se focalizan en una buena gestión de los sistemas ya construidos, no requieren grandes inversiones y que podrían calificarse de preventivas (ver Tabla 2), mientras que las segundas comprenden un amplio abanico de actuaciones que implican algún tipo de elemento constructivo o alguna adaptación urbanística para operar en la estructura de la red (ver Tabla 3).

Tabla 2. SUDS no estructurales (adaptado de Temprano et al., 2008 y de Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007)

Tipo	Actuaciones
Educación y programas de participación	Concienciación de los problemas existentes en el drenaje
	Aumento de la participación ciudadana en el proceso de toma de decisiones
Planificación y diseño de las superficies impermeables	Reducción de la escorrentía superficial
	Disminución de torrentes
Gestión de vertidos y contaminantes	Limpieza de las superficies para reducir contaminantes
	Control de los herbicidas y fungicidas
	Control para evitar arrastre de sedimentos
Prevención y limpieza de vertido	Procedimientos de actuación ante vertidos accidentales
	Utilización de técnicas secas en vez de limpieza con agua
Reutilización de aguas	Recogida y reutilización de aguas pluviales
	Reutilización de aguas grises



Tabla 3. SUDS estructurales (adaptado de Temprano et al., 2008 y de Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007)

Tipo
Cubiertas vegetadas
Franjas filtrantes
Pozos y zanjas de infiltración
Depósitos de infiltración
Depósitos de detención
Drenes filtrantes
Cunetas verdes
Estanques de retención
Humedales
Superficies permeables

Entre los diferentes tipos de SUDS descritos, es destacable el papel que vienen desempeñando las superficies impermeables en los entornos urbanos. Su fácil disposición en determinadas zonas los ha convertido en una de las técnicas SUDS con mayor implementación en las últimas décadas.

2.3 Pavimentos permeables de hormigón poroso

2.3.1 Introducción

Dentro de las soluciones basadas en pavimentos permeables es digno de mención el papel de los pavimentos de hormigón poroso. Estos están formados normalmente por piezas de hormigón con un amplio porcentaje de poros colocados sobre una capa de geotextil que permite el paso de la escorrentía hacia el medio natural o hacia los laterales mediante un sistema de drenes (ver Figura 1).

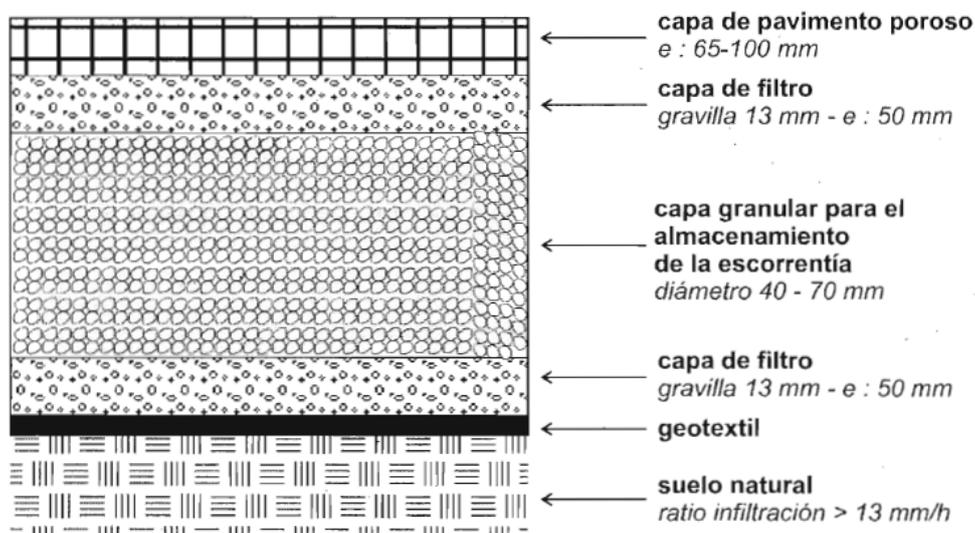


Figura 1. Sección tipo de un pavimento poroso (A.R.C., 2001)



Este tipo de pavimentos tienen muchas de las ventajas asociadas de los SUDS ya descritas. Pueden controlar el flujo de escorrentía en origen, reduciendo los impactos negativos que pudieran sufrir los sistemas de alcantarillado y permitiendo una correcta infiltración al medio receptor, lo cual sirve también de volumen de recarga de los acuíferos. En la mayoría de casos estos SUDS son capaces de absorber la mayoría de lluvias que se van a producir de igual manera que otras superficies vegetadas como patios, parques, zonas arbóreas, etc. También permiten el tránsito de peatones y vehículos sin implicar destinar un área únicamente para su implantación, por lo que son útiles para aprovechar el espacio en las zonas urbanas.

Aun así, estos firmes suelen tener un elevado coste de instalación y su grado de fiabilidad es pequeño si se realiza un mal mantenimiento que puede reducir drásticamente su vida útil. Además, tienen muchos condicionantes a la hora de su implantación. Por ejemplo, no se deberían utilizar en zonas con una previsión de tráfico pesado ni de densidad alta de tráfico, debido a que no están diseñados para resistir esa cantidad de cargas, y tampoco deberían disponerse en zonas con grandes cargas de sedimentos ni en áreas cercanas a industrias metalúrgicas o industrias pesadas ya que se acumularía un exceso de metales o de otros contaminantes que serían vertidos al medio y provocarían su contaminación (Ordóñez et al., 2015).

Este tipo de pavimentos pueden llegar a tener unos altos índices de eliminación de materia disuelta y de partícula elevada, pero no deben utilizarse para eliminar los contaminantes presentes en el agua que filtran porque si no se colmatarían en exceso, por lo que es necesario utilizar otras técnicas de pretratamiento para disminuir la carga de sedimentos a la que tienen que hacer frente. Además, como otro paso previo al montaje de estos pavimentos, sería recomendable analizar los sulfatos infiltrados en el agua para evitar malos olores debido a la producción de sulfuros (Hernández-Crespo et al., 2019).

En relación a su estructura cabe mencionar que consiste en un conjunto de huecos (poros) interconectados de diferentes tamaños, pero que suelen rondar entre 2 y 8 mm dependiendo de la proporción y la compactación (Tennis et al., 2004). Estos poros son los que controlan el comportamiento del pavimento y en estos firmes se suelen alcanzar porosidades del 20% en relación con firmes tradicionales que rondan el 2-3% (Anta et al., 2008).

A pesar de esto, a la hora de su diseño ha de tenerse en cuenta que la cantidad de poros presente en estos pavimentos debe ir aumentando desde la superficie hasta la subbase para conseguir un buen flujo del agua y de los sedimentos, incluyendo a los geotextiles utilizados, los cuales tienen una función principal como filtro, separadores y/o refuerzo estructural (Castro-Fresno et al., 2005). Los poros también afectan a la resistencia del hormigón, la cual depende principalmente de diversos factores como el contenido de cemento, la ratio agua/cemento, el grado de compactación, etc. De media, se puede suponer que dicha resistencia disminuye un 3% con cada 1% de poros incrementados y que un alto contenido de pasta de cemento puede causar una obstrucción localizada en la capa inferior densa, lo que dará lugar a hormigones con poca capacidad de infiltración a pesar de la alta porosidad (Kia et al., 2017).

En estos pavimentos, unas de las características más importantes es la permeabilidad, la cual es una propiedad que describe la facilidad con la que un medio poroso transmite líquido bajo un gradiente hidráulico. Depende directamente de la estructura de los poros y un estudio extenso de la literatura revela que varía ampliamente entre de 0,003 y 3,3 cm/s (Kia et al., 2017), lo que corresponde con 108 y 118800 mm/h, respectivamente. Para obtener una medida cuantitativa de esta permeabilidad se han ido utilizando a lo largo de los últimos años diferentes



metodologías. Entre las más extendidas están el uso del permeámetro LCS ideado en la Universidad de Cantabria, el permeámetro del NCAT, el método ASTM (Razzaghmanesh y Beechman, 2018) o diferentes modelos de infiltración como el de Horton, Kostiaikov y Mezencev (Andrés-Valeri et al., 2018).

2.3.2 Colmatación y pérdida de la capacidad de filtración

La permeabilidad de los paquetes filtrantes se ve principalmente afectada cuando se produce una colmatación de los poros, lo que sucede mayormente cuando las aguas de lluvia transportan sólidos que se han ido uniendo a su flujo y llenan y bloquean los huecos facilitando la acumulación de sólidos. Esta retención es en parte favorable cuando las partículas contaminantes son atrapadas en el firme y no logran llegar al medio receptor, pero también producen problemas al verse reducida la tasa de infiltración, pudiendo llegar a saturar completamente los poros y produciendo desbordamientos de la superficie mediante encharcamientos, con lo que el pavimento perdería su utilidad. A parte del análisis de la permeabilidad ya descrito y del análisis de los hidrogramas correspondientes existen otros métodos empíricos para poder detectar si un firme ha ido colmatándose como pueden ser realizar inspecciones en busca de charcos para ver si el sistema no desagua bien o comprobar los pozos y arquetas cercanas en busca de partículas.

La mayoría de materiales que obstruyen los firmes en los entornos urbanos son sedimentos procedentes de áreas cercanas, escombros de carreteras, partículas originadas por el desgaste del propio pavimento o materia orgánica de vegetación cercana (Ferguson, 2005). En general, la forma de obstrucción dependerá del tamaño de partículas. Las más grandes quedaran retenidas en la superficie superior dando lugar a una impermeabilización en forma de capa. Las partículas finas tenderán a descender a través de los filamentos formados por los poros y saturando estos mismos o incluso la parte inferior de la base (Mata, 2008).

2.3.3 Limpieza y mantenimiento

Para solucionar los problemas ya descritos derivados de la colmatación de los poros es necesario asegurar un buen mantenimiento del hormigón permeable mediante un adecuado programa de limpieza tanto en seco como en mojado. Este mantenimiento debe ser regular para poder garantizar una mínima disminución del rendimiento hidráulico y de su efectividad. El objetivo principal que se quiere conseguir con estos procedimientos es eliminar las partículas que provocan la saturación de los poros y que afectan a las capacidades permeables de estos firmes.

Para conseguir esto hay diferentes métodos entre los que destacan el lavado a presión con agua, que debilita el enlace de las partículas adheridas al firme, y el barrido en vacío, que consiste en un aspirado superficial que succiona las partículas y permite una reapertura de los poros previamente obstruidos. Estos métodos funcionan correctamente cuando las partículas depositadas son de granulometría gruesa y acumuladas en superficie, pudiendo restaurar parcialmente la permeabilidad inicial, pero si la obstrucción ha penetrado en los poros internos del firme estos métodos tradicionales de limpieza no son tan efectivos (Mata, 2008).

En cuanto al mantenimiento, este debe ser regular para evitar llegar a unas obstrucciones que sean irreparables, pero hay que tener en cuenta que nunca se podrán recuperar las tasas de infiltración previas a la colmatación. La frecuencia con la que se deben realizar estas limpiezas



varía según la zona y las condiciones climáticas, ya que en áreas susceptibles de ser más saturadas por un mayor cumulo de deposiciones habrá que realizar mantenimientos más frecuentemente. La frecuencia recomendada varía entre mínimo una vez al año (Drake y Bradford, 2013) y de dos a cuatro veces al año (Gunderson, 2008), pero en los últimos estudios se ha ido confirmando que es necesario realizar pruebas de infiltración al poco tiempo de instalación, aunque el firme no presente indicios de degradación (Razzaghmanesh y Beechman, 2018).

2.3.4 Durabilidad y vida útil

Una vez conocido que el principal problema de este tipo de pavimentos es la saturación de sus poros es necesario aclarar la vida útil de este tipo de pavimentos y saber cuánto podrán durar al implementarse en un caso real. Basándose en diferentes estudios se ha podido comprobar que la vida útil del hormigón permeable suele variar entre 6 y 20 años (Kia et al., 2017) y el cese de su funcionamiento suele deberse principalmente a la colmatación ya comentada, a la degradación por congelación o al desmoronamiento de su superficie debido a fallas prematuras por el desgaste de su estructura acrecentado por una deficiencia en el contenido de huecos o a una mala construcción.

Centrándose en el caso que se va a estudiar en este Proyecto, debe aclararse que inducir una saturación permanente de los poros es complicado. De hecho, estudios similares al de este documento llegaron a utilizar hasta un total de 2 kg/m² de sedimento vertido (Sañudo-Fontaneda et al., 2013) sin que disminuyese la permeabilidad. Esta cantidad de sedimento supondría la equivalente a la acumulada a lo largo de entre 5 y 10 años con un uso continuo del aparcamiento en condiciones normales. Al no verse disminuida su permeabilidad, se puede concluir que la vida útil podría alargarse más de estos 10 años de suposición inicial. Esta elevada vida útil se debió al comportamiento del firme poroso, en el que la mayoría de sedimentos quedaron en la superficie pudiendo ser aspirados.

2.3.5 Investigación e implementación

Es necesario destacar que a nivel científico se han ido realizando numerosas investigaciones de este tipo de firmes permeables a lo largo del mundo. Aun así, los ensayos se han ido centrando más en pruebas en laboratorio o en campo controlados que en situaciones reales de uso en ciudades. Es por esto que, al igual que el resto de SUDS, los pavimentos de hormigón poroso no tienen un uso extendido y su implementación no está totalmente desarrollada.

En el estudio en laboratorio destaca el papel desempeñado por la Universidad de Cantabria con el uso de minisimuladores donde se han ido ensayando diferentes tipologías de firmes. Destaca el simulador diseñado por Hernández-Crespo et al (2019), el cual está compuesto por un tanque de almacenamiento de agua, una bomba y una rejilla de tuberías de riego por goteo que sirven para simular la lluvia (ver Figura 2). Además, cuenta con un pluviómetro que se coloca debajo de los pavimentos para medir el flujo de agua. Otra de las tipologías utilizadas en la Escuela de Caminos de Cantabria es el infiltrómetro que permite estudiar cualquier superficie utilizando probetas de 0,25 m² con intensidades de 10 a 150 mm/h (Sañudo-Fontaneda et al., 2012) y que permite pendientes entre 0 y 10%. También destaca el permeámetro de carga constante (Andrés-Valeri et al., 2018) que se basa en el permeámetro utilizado en la norma europea UNE-



EN 12697-19 para medir la permeabilidad vertical en pavimentos asfálticos porosos, pero adaptado a probetas prismáticas y modificado para adaptarse a dicho estudio (Figura 3).

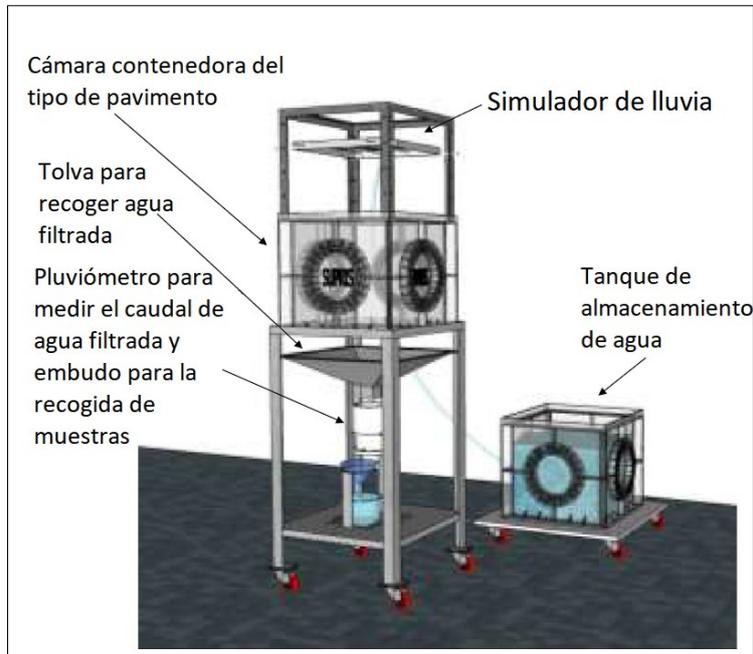


Figura 2. Simulador de lluvia portátil (Hernández-Crespo et al., 2019)



Figura 3. Permeámetro de carga constante (Andrés-Valeri et al., 2018)

Aun así, el desarrollo de los minisimuladores no se ha centrado únicamente en España, sino que en otros proyectos se utilizaron plataformas similares en las que estudiar firmes de $1 \times 1 \text{ m}^2$ (Alsubih et al., 2017) el cual tiene unos componentes muy similares a los ya descritos contando



con un sistema de aspersión, un conjunto de tuberías que proporcionan un caudal estable y un mallado metálico para la dispersión de la lluvia.

El proceso natural siguiente a estudiar los pavimentos permeables en laboratorio es hacer un análisis en campo controlado de la implementación de estos firmes. Entre estos ensayos destacan los realizados en el campus de Cartuja en Granada (Rodríguez-Rojas et al., 2018) utilizando diferentes pavimentos permeables con una subbase compuesta por piedra y grava que permitía el almacenamiento temporal de agua. Estos pavimentos fueron implantados en un aparcamiento de 813 m² (ver Figura 4) y fueron ensayados con un tráfico controlado durante casi un año.

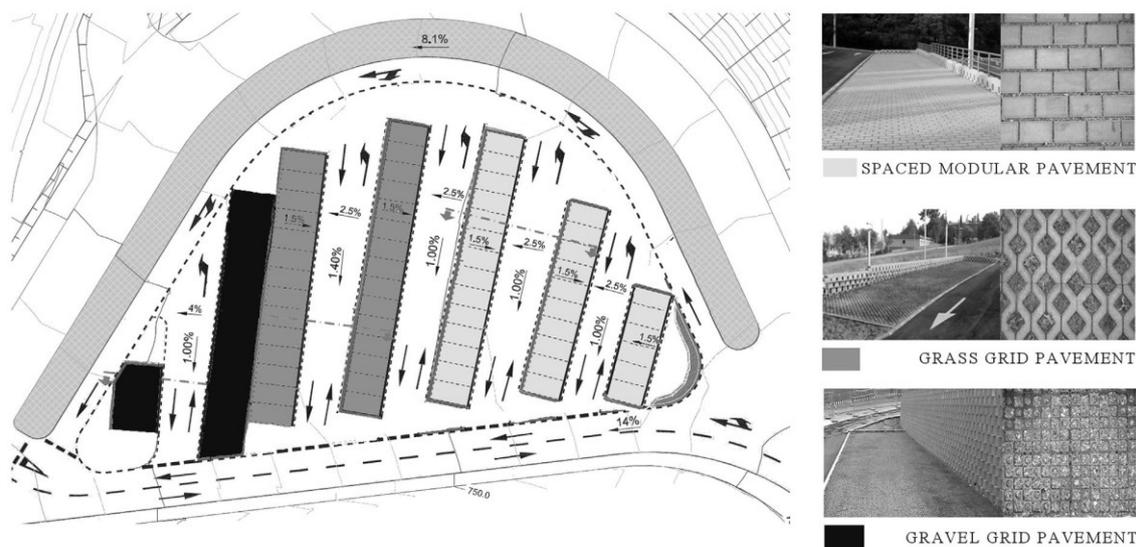


Figura 4. Aparcamiento y pavimentos usados en el Campus de Cartuja (Rodríguez-Rojas et al., 2018)

En otro caso de estudio se analizaron veinte tipologías de pavimentos de hormigón permeable en aparcamientos de California (Kayhanian et al., 2012), donde se utilizaron firmes reciclados con edades comprendidas entre 1 y 8 años para estudiar su utilidad con escasos recursos. Esta tipología dio problemas debido a la alta heterogeneidad de firmes con envejecimientos tan dispares. Siguiendo esta línea Kumar et al. (2016) estudiaron durante cuatro años tres tipologías diferentes de pavimentos permeables, entre los que se encontraba el hormigón poroso en un aparcamiento de la Stickney Water Reclamation Plant. Llegaron a la conclusión de que la infiltración era menor en las zonas con tráfico que en las de estacionamiento debido al desgaste ocasionado por el movimiento de vehículos.



En relación a la aplicación en campo real, cabe destacar que la primera experiencia española de SUDS fue llevada a cabo mediante pavimentos permeables. Concretamente en 2003 el Ayuntamiento de Madrid aplicó los criterios y la tecnología de SUDS en las obras de remodelación del Parque Gomeznarro. En este proyecto se reemplazaron los caminos impermeables existentes por suelos permeables con el objetivo de controlar la escorrentía y poder utilizar el agua captada para el riego de las zonas verdes cercanas. En Barcelona destaca la implantación en 2008 por primera vez en la ciudad condal SUDS en el Parque del Torrente de las Monjas y en 2009 cobra especial relevancia una zanja de infiltración en medio de la avenida que cruza el Parque Universitario. La primera aplicación de pavimento permeable en España fue en 2005 en Gijón con la construcción del aparcamiento de “La Guía”, donde se disponían setecientas plazas de estacionamiento (ver Figura 5).



Figura 5. Pavimentos permeables en el parque de La Guía (Castro-Fresno et al., 2013)

Es reseñable que los primeros quince lotes de pavimentos permeables utilizados en este parque sirvieron como medio de ensayo del proyecto FIDICA comentado anteriormente. Como última obra importante se comenta la construcción en 2007 del parque de “Las Llamas” en Santander, el cual cuenta con un humedal artificial y cuarenta y cinco plazas de aparcamiento entre las que se encuentran pavimentos de asfalto poroso, hormigón poroso y células de hormigón y plástico.

Los resultados de todos estos experimentos en los que se han visto implicados diferentes tipos de SUDS han sido dispares. Para poder entender bien si han resultado útiles o que problemas han ocasionado se ha elaborado un resumen final (ver Tabla 4).



Tabla 4. Resumen de resultados de investigación

Tipo de SUDS	Referencias	Resultados destacables
Pavimento permeable ensayado en minisimulador	Hernández-Crespo et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none">– Se ha reducido la contaminación filtrada al terreno.– Se consiguen retener grandes volúmenes de agua.– Con un lavado continuo del pavimento el agua filtrada es adecuada para reutilizar en riego.– Es necesaria una limpieza en seco constante sobre todo con altas intensidades de lluvia.
Pavimento permeable ensayado en infiltrómetro	Sañudo-Fontaneda et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none">– La capacidad de infiltración aumenta hasta el 99,5% con pendientes cercanas al 0%.– Con una limpieza adecuada se consigue una recuperación de la infiltración del 99% y del 10% para pendientes del 0% y del 3%, respectivamente.
Pavimento permeable ensayado en permeámetro de carga constante	Andrés-Valeri et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none">– Las tasas de infiltración en condiciones insaturadas fueron diez veces mayores que en condiciones saturadas.– Los efectos de la colmatación fueron más influyentes en condiciones insaturadas que saturadas.
Pavimento permeable ensayado en minisimulador	Alsubih et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none">– Se consiguió retener más del 40% de la precipitación total ensayada.– Se consiguió retrasar el flujo de salida en varias horas.– Se tardó en descargar las precipitaciones un total de 7 h desde el comienzo de los ensayos.– Aumentar la duración de las lluvias y aumentar la humedad inicial provocaron un mayor flujo de salida del agua.
Pavimento permeable en aparcamiento (campus de Cartuja)	Rodríguez-Rojas et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none">– Se ha demostrado que los pavimentos permeables reducen considerablemente los volúmenes de agua vertidos al medio.– Se han conseguido unas eficiencias en la absorción de la lluvia de más del 70%.
Pavimento de hormigón permeable en aparcamiento (California)	Kayhanian et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none">– La permeabilidad en los aparcamientos más antiguos fue mucho menor que en los más nuevos.– Las partículas finas menores a 38 μm produjeron reducciones de la permeabilidad más grandes.– Los días con temperaturas superiores a 30$^{\circ}$ C hubo reducciones de permeabilidad mayores.



Tipo de SUDS	Referencias	Resultados destacables
Pavimentos permeables en aparcamiento (Stickney Water Reclamation Plant)	Kumar et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none">– El estado físico de los pavimentos de hormigón poroso fue el mejor, seguido de los adoquines permeables y del asfalto permeable.– La capacidad de infiltración fue mayor en el asfalto permeable, seguida del hormigón poroso y de los adoquines permeables.– El mayor descenso de las tasas de infiltración debido a la colmatación se produjo a los tres años de uso del aparcamiento.
Pavimentos permeables en el Parque Gomeznarro	Ayuntamiento de Madrid (2003)	<ul style="list-style-type: none">– Se consiguió evitar la aparición de escorrentías superficiales.– Desaparecieron los encharcamientos que se producían antes.– Se evitó que un caudal de 5000 m³ fuese a parar a la depuradora.
SUDS en el Parque del Torrente de las Monjas	Ayuntamiento de Barcelona (2008)	<ul style="list-style-type: none">– No se disponen de datos al no haberse analizado de forma sistemática.
Zanja de infiltración en el Parque Universitario	Ayuntamiento de Barcelona (2009)	<ul style="list-style-type: none">– No se disponen de datos al no haberse analizado de forma sistemática.
Pavimento permeable en el aparcamiento de “La Guía”	Ayuntamiento de Gijón (2005)	<ul style="list-style-type: none">– No se disponen de datos al no haberse analizado de forma sistemática.
Humedal y pavimentos porosos en el Parque de “Las Llamas”	Ayuntamiento de Santander (2007)	<ul style="list-style-type: none">– No se disponen de datos al no haberse analizado de forma sistemática.



3 Objetivos

Este Proyecto Técnico está enmarcado dentro de una línea de investigación del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente – GEAMA, la cual se basa en estudiar las ventajas de la aplicación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

El objetivo principal de este trabajo es analizar el funcionamiento hidráulico y el rendimiento de eliminación de contaminantes del sistema Dry Paving System (DPS), el cual está patentado por las empresas Pavimentos de Tudela – PVT, Hidrostant y AH Asociados y se compone de unas losas de hormigón permeables ecoDraining con juntas colocadas sobre una estructura de geoceldas poliméricas Hydrocell. Además, se evaluará su utilidad a la hora de implementarlas en zonas urbanas comparándolos con el comportamiento de los tradicionales pavimentos impermeables, para poder concluir si es beneficioso sustituir los firmes impermeables por otros permeables.

Para conseguir este objetivo se han desarrollado una serie de objetivos secundarios:

- Preparación del montaje experimental de un simulador de lluvia que sirva para estudiar el comportamiento hidráulico de estas losas y de otros pavimentos y secciones filtrantes.
- Monitorización de los diferentes hidrogramas de caudales para poder medir la permeabilidad y la capacidad de infiltración del tipo de firme estudiado.
- Análisis de la colmatación de los poros del pavimento empleando sólidos recogidos en la superficie del viario del campus de Elviña con diferentes granulometrías para, de este modo, poder investigar cómo esta saturación influye en la capacidad de infiltración del firme y en su permeabilidad. En esta fase del estudio también se ha analizado la capacidad de recuperación de la infiltración tras su limpieza.
- Realización de un balance de masas para estudiar la acumulación del sedimento en el firme.



4 Metodología

Para conseguir los objetivos remarcados en el apartado previo se ha desarrollado una estructura dividida en 3 bloques diferenciados que se describen brevemente en los siguientes subapartados:

- **Fase 1 - Montaje experimental.** Esta fase abarca el proceso de construcción del simulador de lluvia empleado en el Proyecto Técnico y la preparación previa de todos los elementos necesarios para realizar los ensayos posteriores.
- **Fase 2 - Caracterización hidrológica con la losa sin sedimento.** El segundo subapartado correspondería con el análisis de la hidrología y la capacidad de infiltración de la superficie impermeable y del sistema Dry Paving System antes de provocar la colmatación del firme.
- **Fase 3 - Caracterización de la retención y de la colmatación de la losa.** Esta fase agrupa todos los estudios sobre la reducción de la capacidad de infiltración del DPS debido al vertido de dos tipos de sedimentos de granulometrías diferenciadas y también abarca el estudio de la recuperación de esta capacidad mediante un aspirado superficial.

4.1 Montaje experimental

4.1.1 Módulo de ensayos

Para comenzar, se ha tenido que realizar la construcción de un simulador de lluvia que permitiese llevar a cabo los diferentes ensayos previstos. Dicho simulador comenzó siendo una estructura vertical con dos únicos módulos y unas dimensiones diferentes a las finales (ver Figura 6) y está basado en los dos simuladores ya existentes en el laboratorio de hidráulica del CITEEC, pero a una escala menor.



Figura 6. Fase previa del simulador



Una vez construida la base se ha procedido a modificarla para adaptarse a las necesidades de este y de futuros proyectos, por lo que finalmente el simulador se ha diseñado como un conjunto de tres módulos unidos entre sí (ver Figura 7).

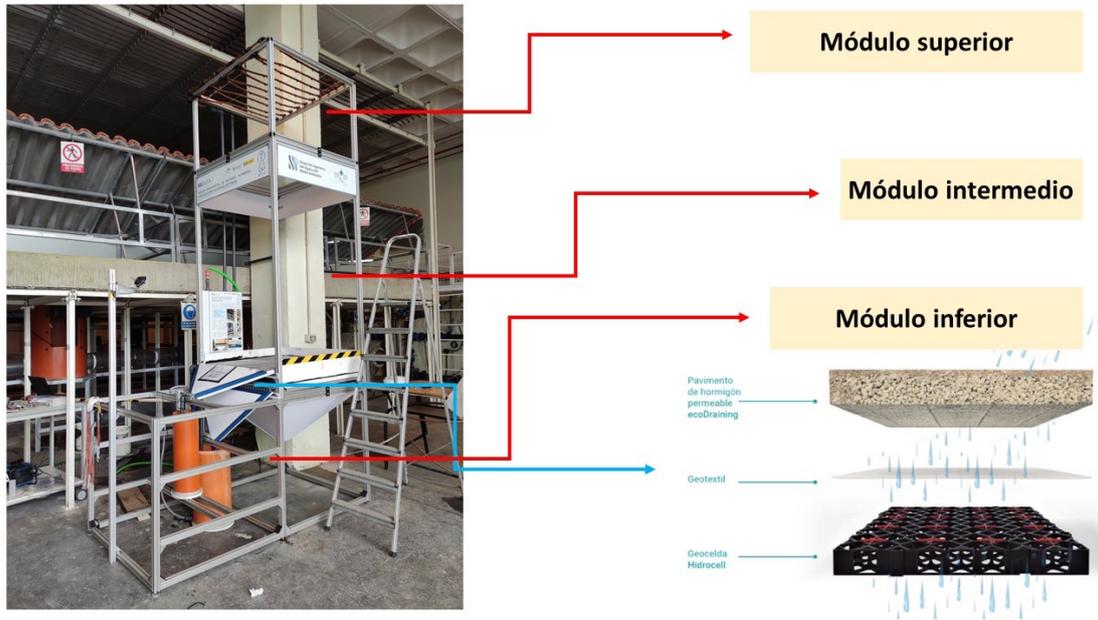


Figura 7. Detalle explicativo del simulador de lluvia con el módulo ensayado

– **Módulo superior de generación de lluvia:**

En esta zona se encuentra un sistema de dos grupos de goteros autocompensantes (ver Figura 8) que proporcionan lluvias de 30 y 50 mm/h para, en conjunto, permitir simular precipitaciones de hasta 80 mm/h. Además, en la parte inferior se dispone una malla metálica de 3 mm que tiene como función dividir las gotas de lluvia para ensayar una situación lo más real posible. Este sistema es análogo al propuesto por Naves et al. (2020) para el resto de simuladores del laboratorio del CITEEC.

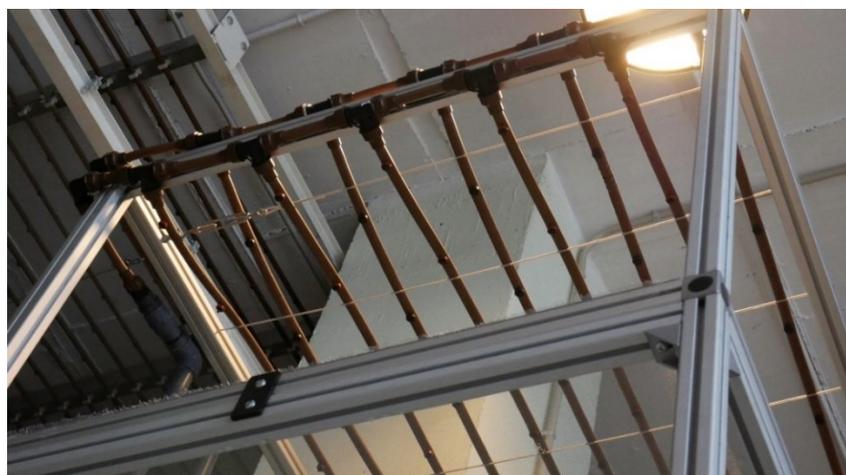


Figura 8. Módulo de ensayos superior



- **Módulo intermedio de ensayos:**
Tiene dos funciones principales: servir de soporte para los diferentes firmes que se quieran estudiar en el simulador y proporcionar la suficiente distancia vertical para que las gotas de lluvia alcancen una velocidad terminal y adquieran características realistas (Naves et al., 2020).
- **Módulo inferior de instrumentación:**
En esta parte se ubican tres grupos de tolvas (ver Figura 9) que tienen como función canalizar el agua filtrada, infiltrada y de escorrentía superficial. Esto se consigue gracias a la pendiente del 2% que se ha asignado y así se canaliza el agua hacia unos depósitos que sirven para medir el nivel a través de unos sensores de ultrasonidos colocados para tal efecto. Uno de los recipientes tiene un diámetro de 300 mm y se destina a la recogida del caudal filtrado, mientras que el otro es de 200 mm y es utilizado para captar la escorrentía superficial.



Figura 9. Módulos de ensayos intermedio e inferior

Todos estos módulos han sido contruidos mediante unos perfiles de aluminio y unas escuadras para su unión. En relación a las dimensiones en planta, tanto el módulo superior como el intermedio ocupan una superficie de 1x1 metros cuadrados, mientras que el inferior es más alargado y tiene un área de 2x1 metros cuadrados. Además, verticalmente los módulos varían



en dimensiones, siendo el inferior de 1 metro, el intermedio de 2 metros y el superior de 0,5 metros.

4.1.2 Paquetes de firme

Como se ha comentado en el subapartado anterior, el módulo intermedio se destina para ubicar los firmes que sirven de objeto de los ensayos posteriores. En este caso, se han utilizado dos tipologías:

- La primera es la propia plataforma de soporte que sirve de superficie impermeable. Está compuesta por una placa de plástico de 1x1 metros cuadrados de dimensiones y sirve para estudiar la escorrentía superficial producida al simular un firme impermeable.
- La segunda corresponde con el sistema Dry Paving System (<https://dps-system.com/>) formado por cuatro losas ecoDraining de hormigón permeable con separadores laterales que garantizan unas juntas uniformes por las que se puede filtrar el agua. Además, su capa superior actúa de tamiz y evita la saturación de la capa inferior. Este pavimento es modular y tiene una capacidad drenante de más de 100 L/m²/min. Está compuesto por áridos silíceos, graníticos o basálticos, de alta resistencia e incorpora materiales reciclados (RCDs). Su cara vista tiene la capacidad de descontaminar el aire de NOx y otros contaminantes, siendo clase 3 según la norma UNE 127197-1 2013. Cada losa tiene una superficie de 0,50x0,50 metros cuadrados, para hacer un total de 1x1 metros cuadrados en total, y un espesor de 5 cm. Sus zonas laterales se han impermeabilizado mediante unos paneles que se han sellado y pegado a ellas y a las que se les han colocado una tela asfáltica autoadhesiva para evitar filtración de agua en esa zona.

Dichas losas han sido colocadas sobre una capa de geotextil que facilita la infiltración del agua y evita el paso de partículas más finas. Esta capa también cumple una función de filtrado de los sedimentos que pudieran colarse a través de las juntas.

Toda la estructura se sustenta sobre unas geoceldas Hidrocell de alta capacidad de retención (ver Figura 10). Estas geoceldas son una geoestructura plástica de alta resistencia que permite la captación, acumulación y transporte subterráneo del agua de lluvia. Está fabricada con polipropileno negro reforzado con cargas minerales y es un material 100% reciclado y reciclable. Además, permiten la configuración en distintas alturas logrando una mayor capacidad de retención del agua bajo superficie. Se engarzan por medio de un sistema de crucetas y hendiduras especialmente diseñado para asegurar su ajuste.

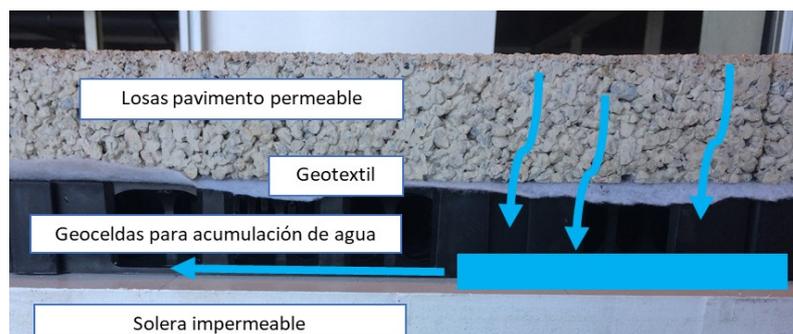


Figura 10. Detalle del sistema Dry Paving System



4.1.3 Determinación de niveles y caudales

Con la estructura necesaria ya preparada se han dispuesto los diferentes sensores que sirven para calcular el flujo de caudal que viaja a través de las losas a ensayar. En este caso, se han utilizado unos sensores de ultrasonidos de bajo coste modelo HC-SR04 (ver Figura 11) que miden en milisegundos el tiempo que tarda en retornar el haz desde su emisión. Esta medición se realiza cada 100 ms y su precisión es de ± 10 mm, según la información del proveedor. Se ha decidido usar esta tipología de aparatos debido a su bajo coste y para poder valorar si funcionan correctamente y si podrían seguir implementándose en futuro proyectos en vez de otros sensores de mayor precio. Han sido montados en una placa de Arduino (ver Figura 12), ubicados dentro de los depósitos descritos anteriormente (ver Figura 13) y, a su vez, dentro de unos tubos de pequeño diámetro para disminuir el efecto de la ondulación del agua.



Figura 11. Sensor de ultrasonidos HC-SR04

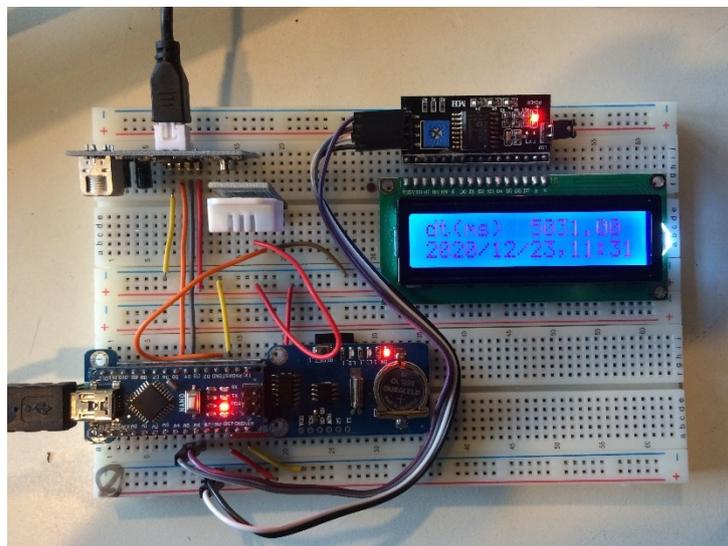


Figura 12. Montaje del sensor de ultrasonidos HC-SR04



Figura 13. Posición del sensor de ultrasonidos en el depósito de infiltración

Para calcular los caudales que pasan al depósito ha sido necesario calibrar el sensor previamente. Para ello se han medido, desde un punto de referencia situado en la base del simulador, diferentes alturas de lámina de agua constantes en los dos depósitos cilíndricos. Posteriormente se ha hecho la media de un minuto de las señales obtenidas por el sensor en cada uno de los puntos de calibración. Con esto se ha podido obtener una regresión lineal entre la señal en milisegundos y el nivel en el depósito.

Al ser conocidas las dimensiones de los depósitos puede calcularse el volumen a partir de la lámina de agua estimada mediante la señal del sensor. Finalmente, se ha obtenido el caudal entrante en los depósitos como la derivada del volumen respecto al tiempo. Para evitar irregularidades en los hidrogramas, este último paso se ha dividido en dos fases:

1. Se ha hecho una media móvil centrada de los datos de volumen obtenidos con un rango de 200 valores.
2. Para cada punto de la serie temporal se ha realizado una regresión de tercer grado centrada en ese punto y considerando los 200 valores más cercanos. El polinomio resultante para cada instante es derivado y evaluado en dicho punto.

Con esta metodología se han obtenido los hidrogramas del flujo filtrado y de escorrentía durante los ensayos. Una vez obtenido el caudal, se pueden realizar los análisis contemplados en el apartado de resultados.

4.1.4 Determinación de permeabilidad de las losas

Para la medición de la permeabilidad se ha utilizado un permeámetro diseñado por el Laboratorio de Caminos de Santander, es el aparato conocido como Permeámetro LCS (ver Figura 14). El LCS está formado por las siguientes partes (NLT-327/88):



- Base de apoyo rígida circular de acero de 165 mm de diámetro y 10 mm de espesor, con un orificio circular en la parte inferior de 40 mm.
- Tubo cilíndrico de 40 mm de radio exterior y 30 mm de radio interior, de 45 mm de altura y que se coloca dentro del orificio de la base.
- Tubo cilíndrico transparente de 94 mm de diámetro interior y 500 mm de altura que se une estancamente con la base de apoyo y estará debidamente reglada.
- Pesa tórica de $20 \pm 0,5$ kg de masa cuyo orificio permita apoyarse sobre la base circular.
- Anillo circular estanco de caucho de 16 mm de espesor para permitir una adaptación a la superficie del pavimento.



Figura 14. Permeámetro LCS

Este instrumento se ha ido colocando en los nueve puntos indicados (ver Tabla 5). Para asegurar que siempre son los mismos puntos se han marcado en la superficie de las losas (ver Figura 15). De este modo se tienen cuatro puntos en los centros de cada losa, cuatro en los centros de cada junta y uno en la intersección entre juntas.

Tabla 5. Coordenadas de los puntos de ensayo del permeámetro

Punto	X (cm)	Y (cm)
1	25	25
2	25	50
3	25	75
4	50	25
5	50	50
6	50	75
7	75	25
8	75	50
9	75	75

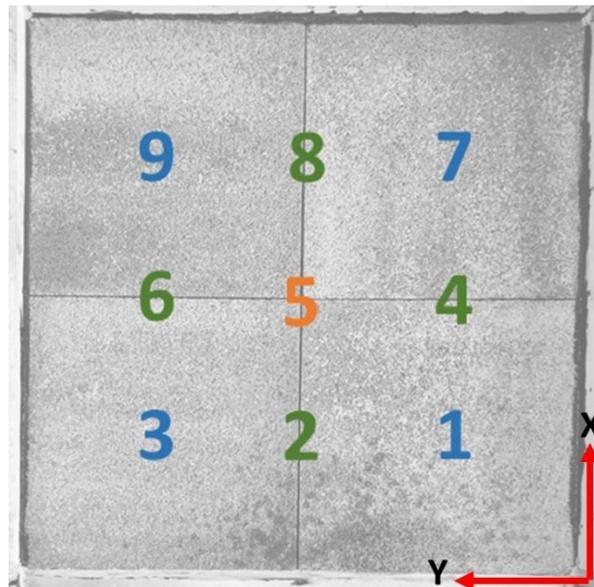


Figura 15. Distribución de puntos de ensayo del permeámetro

El proceso de medición de la permeabilidad ha consistido en colocar el permeámetro taponado en el punto correspondiente, acto seguido se ha rellenado de agua sobrepasando 15 cm la marca superior, para, posteriormente, retirar el tapón y cronometrar el tiempo que transcurre entre que el nivel del agua desciende desde la marca superior hasta la inferior. Este proceso se ha repetido para todos los puntos siguiendo el orden descrito: punto 1, 3, 2, 4, 6, 5, 7, 9, 8. De este modo se ha obtenido un tiempo de descenso con el cual se puede calcular el coeficiente de permeabilidad mediante la siguiente fórmula (NLT-327/88):

$$\text{Permeabilidad} \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) = 360 * e^{(7.624 - 1.348 * \text{LN}(T))} \quad (1)$$

donde **T** es el tiempo en segundos de descenso.

Para la correcta determinación del tiempo de descenso, según la norma de la ETSICCP de la Universidad de Cantabria, se deben realizar dos medidas en cada punto deseado y tomar como referencia la segunda. Estas indicaciones se han seguido así para medir la permeabilidad en las losas permeables previa colmatación, pero se ha concluido que las diferencias entre la primera y segunda medida son despreciables (del entorno del 2%), por lo que, en los ensayos colmatados, solo se ha realizado una medida por punto para evitar el lavado de los sedimentos.

Para complementar el estudio de la infiltración también se ha utilizado un modelo Hach Sigma 950 (ver Figura 16). Este aparato, por medio de una emisión de burbujas, proporciona unas señales en mA que transformadas a nivel han servido para analizar la velocidad del descenso del nivel de agua, por lo tanto, permiten visualizar de otro modo la disminución en la capacidad de infiltración del DPS. El sensor emite aproximadamente una burbuja por segundo con una precisión de ± 3 mm. Para poder realizar esta operación, se ha colocado en el permeámetro LCS un tubo que se conecta con el sensor de burbujas y que transmite la presión producida por el agua a medida que esta desciende.



Figura 16. Sensor de burbujas Hach Sigma 950

4.2 Caracterización hidrológica con losas sin sedimento

4.2.1 Uniformidad de la lluvia

Una vez preparado todo el sistema, y como último paso previo a la realización de los ensayos, ha sido necesario comprobar el buen funcionamiento del simulador de lluvia. De este modo, se ha calculado la uniformidad de la lluvia proporcionada por el sistema de goteros.

Para poder realizar este paso, se han colocado un total de treinta y seis vasos (ver Figura 17) de un litro de capacidad equiespaciados cada quince centímetros y se ha procedido a medir la cantidad de agua que acumulan para las lluvias de 30, 50 y 80 mm/h. Estas lluvias han tenido una duración de 15 minutos para las intensidades de 30 y 50 mm/h y de 10 minutos para 80 mm/h.

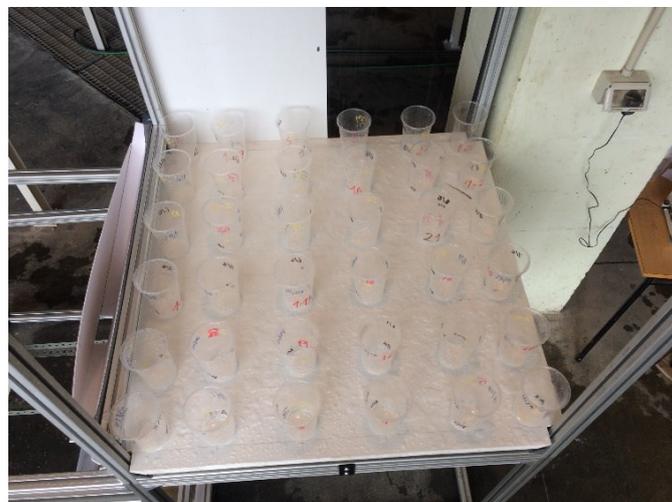


Figura 17. Medición de la uniformidad de las precipitaciones



Para realizar esta medición se ha comparado la masa de los vasos secos y la masa tras la lluvia. Con la masa de lluvia y la densidad del agua conocida se puede averiguar el volumen de agua en cada vaso, el cual se divide entre el área de dichos recipientes y se obtienen los mm de lluvia producidos, ya que en intensidades $L/m^2=mm$. Con este último dato se dividen los valores entre la duración del ensayo y ya se obtienen las intensidades en mm/h. Finalmente, se han podido hallar los coeficientes de uniformidad según la siguiente fórmula (Christiansen, 1942):

$$UC = 100 \left(1 - \frac{\sum_1^n |\bar{x} - x_i|}{n\bar{x}} \right) \quad (2)$$

donde x_i es la intensidad de lluvia en cada vaso, \bar{x} la media de intensidades de lluvia y n el número de muestras.

4.2.2 Comportamiento hidráulico

Con todo el conjunto del simulador preparado y listo para usarse, se ha continuado con el plan de ensayos descrito en la Tabla 6. Se han realizado dos ensayos con el Dry Paving System que serán llamados Ensayo 1 y Ensayo 2 y que se corresponderán con los ensayos de colmatación que se presentarán más adelante. Estos se diferencian en que en el 1 se ha estudiado su colmatación con un sedimento de 250 a 500 μm , mientras que el 2 ha sido analizado con una granulometría de 63 a 125 μm . En ambos casos el plan de ensayos es el mismo.

Tabla 6. Plan de ensayos de la Fase 2

Situación	Pasos	Descripción
Plataforma impermeable	P1	Lluvia de 80 mm/h durante 30 minutos
		Tiempo de relajación de 30 minutos
		Registro del hidrograma de 60 minutos
Losas permeables	P2	Colocación y montaje del DPS
		Lluvia de 80 mm/h durante 30 minutos
		Tiempo de relajación de 30 minutos
		Registro del hidrograma de 60 minutos
		Espera de 24h
	P3	Ensayo de 30 minutos con lluvia de 80 mm/h
		Tiempo de relajación de 30 minutos
		Registro del hidrograma de 60 minutos
		Espera de 24h
	P4*	Repetición de P3 con duraciones de 5, 10 y 15 minutos de lluvia
	P5	Análisis de permeabilidad con LCS y Hach Sigma 950 al terminar el último ensayo y antes de la espera de 24h
		Espera de 24h
	P6	Sellado de las juntas
		Lluvia de 80 mm/h durante 30 minutos
		Tiempo de relajación de 30 minutos
Registro del hidrograma de 60 minutos		

**En el Ensayo 2 este paso no se ha llevado a cabo*



En primer lugar, se ha comenzado con la realización de una serie de mediciones en la superficie impermeable. En esta no se ha colocado ningún pavimento y se han ido introduciendo precipitaciones directamente sobre la base del módulo intermedio. El procedimiento seguido ha sido el de medir la esorrentía generada por una precipitación de 80 mm/h durante 5, 10, 15 y 30 minutos y a continuación seguir midiendo el volumen residual que pueda quedar fluyendo durante otra media hora de goteo.

Con los datos obtenidos de cómo se comporta un firme totalmente impermeable, se ha continuado la programación con el Ensayo 1, colocando el sistema DPS con sus losas ecoDraininig. Una vez posicionadas, se ha procedido a efectuar una primera lluvia de 30 minutos para continuar con el Ensayo 1 al día siguiente. Esto se ha hecho así para que no estuvieran secas completamente y se pudiera proceder a realizar siempre con una cierta humedad en las losas. Hay que aclarar, que este procedimiento se ha seguido cada vez que se han cambiado las losas de firme.

Con el firme humedecido se han realizado una serie de precipitaciones de 5, 10, 15 y 30 minutos de duración, dejando siempre 24 horas de espera entre cada una de estas lluvias. En estos pasos las precipitaciones han sido de 80 mm/h durante el tiempo descrito, y una vez transcurrido ese instante, se ha dejado un periodo de 30 minutos de tiempo de relajación (ver Figura 18). Hay que tener en cuenta que, cuando se ha terminado con el último paso de la serie, se ha procedido a efectuar un análisis con el permeámetro LCS y con el Hach Sigma 950 de la forma ya descrita anteriormente. Se aclara que este apartado, como aparece en el plan de ensayos, se ha realizado así únicamente para el Ensayo 1, ya que, para el 2, al suponerse losas análogas, solo se han realizado análisis de 30 minutos, obviando los de 5, 10 y 15 minutos.

Posteriormente, al concluir estos cuatro pasos y al acabar el análisis de la permeabilidad, se han cubierto las juntas y se ha realizado otra medición de 30 minutos de lluvia y 30 minutos de relajación seguido de un análisis de la permeabilidad con el LCS y con el sensor de burbujas. Con este procedimiento se han podido obtener unos datos con un criterio único y que sirven para analizar unos resultados coherentes obtenidos mediante una metodología concreta.



Figura 18. Precipitación de 80 mm/h en la losa permeable



4.3 Caracterización de la retención y la colmatación del Dry Paving System

La siguiente fase de estudio de este firme ha consistido en analizar la reducción de la permeabilidad y de la infiltración al producirse una colmatación del firme. Esta se ha realizado en dos tandas, con granulometría de 250 a 500 μm (Ensayo 1) y de 63 a 125 μm (Ensayo 2), donde el d_{50} del primer ensayo son 391 μm y el del segundo 104 μm (ver Figura 19). Además, en cuanto a su densidad, se ha calculado que la del sedimento del Ensayo 1 es de 2652 kg/m^3 y la del Ensayo 2 de 2931 kg/m^3 .

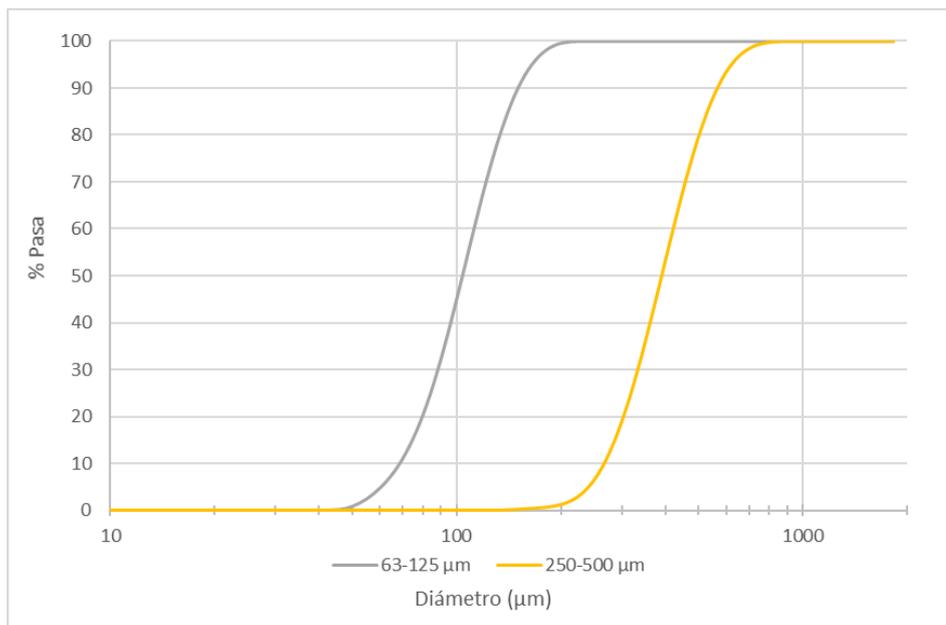


Figura 19. Caracterización granulométrica de sedimentos utilizados

Una vez que se ha terminado el proceso que se detallará en los siguientes párrafos se han aspirado y desmontado las losas saturadas, colocado unas nuevas y repetido el proceso con el sedimento de nueva granulometría, pudiendo comenzar el Ensayo 2. El procedimiento empleado se define en la Tabla 7.



Tabla 7. Plan de ensayos de la Fase 3

Situación	Pasos	Descripción
Colmatación	P7	Dosis de 100 gr de sedimento
		Lluvia de 80 mm/h durante 30 minutos
		Tiempo de relajación de 30 minutos
		Registro del hidrograma de 60 minutos
		Tiempo de relajación de 24h
	P8	Repetición de P5 con dosis de 200, 300 y 400 gr de sedimento
	P9	Análisis de permeabilidad con LCS y Hach Sigma 950 al llevar 1kg de sedimento y antes de la espera de 24h
		Tiempo de relajación de 24h
	P11	Sellado de las juntas
		Lluvia de 80 mm/h durante 30 minutos
		Tiempo de relajación de 30 minutos
		Registro del hidrograma de 60 minutos
		Análisis de permeabilidad con LCS y Hach Sigma 950
		Espera de 24h
	P12	Aspirado superficial de las losas
		Lluvia de 80 mm/h durante 30 minutos
		Tiempo de relajación de 30 minutos
		Registro del hidrograma de 60 minutos
		Análisis de permeabilidad con LCS y Hach Sigma 950
	P13	Desmontaje del DPS
		Balance de masas

La masa del sedimento total distribuido ha sido de 1 kg y se ha hecho de una manera uniforme mediante un tamiz creado para tal propósito (ver Figura 20). Este aparato se ha colocado en la mitad de cada losa, con lo que se ha esparcido el sedimento en un total de ocho zonas (dos por cada losa). Para efectuar esta distribución y realizar los ensayos correspondientes se ha vertido el sedimento en tandas de 100, 200, 300 y 400 gramos. Cada una de estas se han visto sucedidas de una lluvia de 80 mm/h de 30 minutos de duración y de un posterior tiempo de relajación de 30 minutos. Estas mediciones se han hecho dejando siempre 24 horas de espera entre cada tanda.

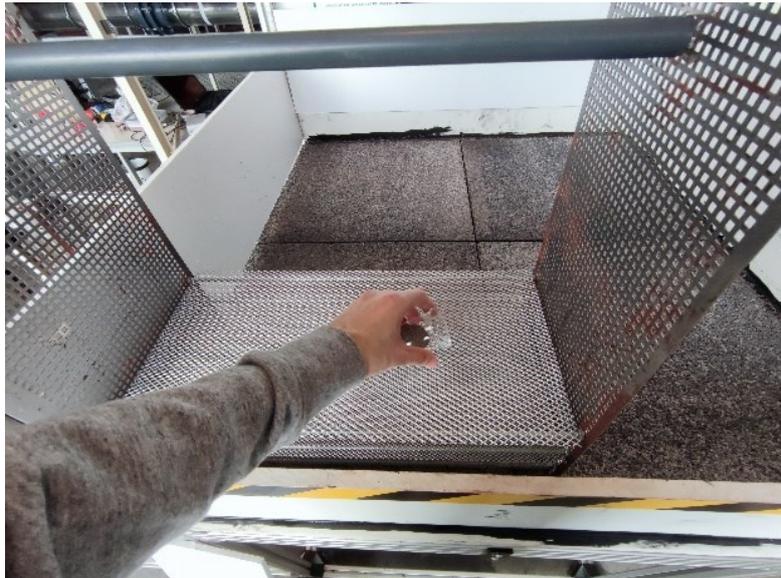


Figura 20. Tamizador utilizado para la distribución del sedimento

Al haber terminado el último ensayo las losas ya cuentan con 1 kg de sedimento ya distribuido, por lo que se ha procedido a analizar la permeabilidad con el Permeámetro LCS y con el sensor de burbujas. Después de finalizar con el paso anterior, se ha procedido a sellar las juntas de la misma manera en la fase previa a la colmatación. Después de analizar esta situación se ha continuado efectuando una medición con el permeámetro LCS y el Hach Sigma 950 de forma análoga a lo ya descrito en el apartado previo. Una vez se ha finalizado con el proceso de colmatación, se ha llevado a cabo una fase de limpieza mediante la aspiración del sedimento superficial (ver Figura 21). Esto se ha realizado con un aspirador industrial siguiendo un movimiento longitudinal a lo largo de las losas. De este modo se ha podido eliminar parte del sedimento acumulado.



Figura 21. Proceso de aspiración de sedimentos



Cuando se ha realizado esta limpieza superficial se ha proseguido con una serie de precipitaciones de 30 minutos y otros 30 minutos de relajación. A continuación, se ha vuelto a efectuar un análisis con el permeámetro y con el medidor de burbujas como ya se ha explicado para poder estudiar si se había producido una recuperación de la permeabilidad debida al aspirado.

Finalmente se ha llevado a cabo un balance de masas en el cual se ha supuesto un sedimento inicial vertido de 1kg exacto. Para ello se han contabilizado los sedimentos obtenidos de la aspiración superficial de las losas permeables, los aspirados de los depósitos de acumulación de lluvia, los aspirados entre las geoceldas y los retenidos en el geotextil. Esto se puede comprobar mediante la siguiente fórmula:

$$M_{\text{Sedimento retenido en losa}} = M_{\text{Sedimento inicial}} - M_{\text{Sedimento aspirado superficie}} - M_{\text{Sedimento aspirado depósito}} - M_{\text{Sedimento aspirado geocelda}} - M_{\text{Sedimento en Geotextil}} \quad (3)$$

donde **M** son las masas de los sedimentos.

De este modo, analizando la diferencia entre el sedimento vertido y el resto de sedimentos descritos se puede calcular la cantidad estimada de sedimento retenido en los poros del firme. Cuando todo este conjunto de procedimientos ha sido realizado, se ha desmontado el DPS, se ha limpiado todo el material y se han vuelto a colocar las nuevas losas para repetir todo el proceso con la nueva granulometría de sedimento en el Ensayo 2.



5 Resultados

5.1 Caracterización del módulo de ensayos

5.1.1 Uniformidad de la lluvia

Los primeros resultados que además serán el pilar para asegurar el buen funcionamiento de este simulador son los relativos a la uniformidad de la lluvia producida por el sistema de goteros autocompensantes. Como ya se ha explicado, estos resultados se dividen en los tres ensayos realizados de las tres intensidades disponibles en el simulador.

A pesar de que se ha trabajado siempre con intensidades de 80 mm/h, también se ha estudiado el comportamiento del sistema de lluvia para los dos tipos de gotero de 30 y 50 mm/h. Para una intensidad de precipitaciones de 30 mm/h se consigue una uniformidad general del 87,8%, un valor bastante aceptable teniendo en cuenta que el sistema de goteros funciona mejor cuanto mayor es la intensidad. Para 50 mm/h, esta uniformidad aumenta hasta el 92,8%. Finalmente, para la lluvia de 80 mm/h (ver Figura 22) la uniformidad alcanza su máximo con 93,5% al sumarse la acción de los dos tipos de goteros. Hay que tener en cuenta que la uniformidad disminuye en los laterales debido a que los goteros no se han podido colocar en los bordes del módulo superior por el espacio existente en el propio sistema. Con todos estos resultados se puede asegurar que el simulador de lluvia se ha construido de una manera eficiente y correcta, sobre todo teniendo en cuenta que la mayoría de ensayos que se han realizado son correspondientes con lluvias de 80 mm/h de intensidad.

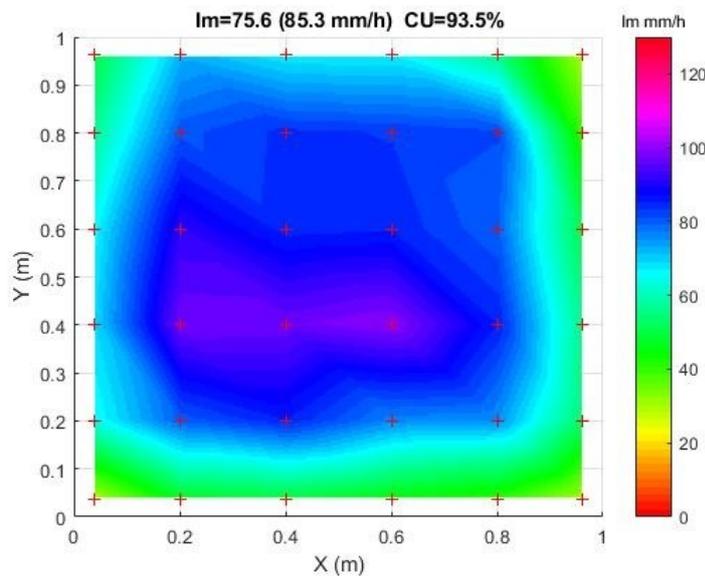


Figura 22. Mapa de distribución de lluvias para intensidad de 80 mm/h

5.1.2 Calibración de sensores y determinación de caudales

Como ya se ha explicado en el apartado de metodología, lo primero que ha hecho falta para poder realizar unos ensayos coherentes es conseguir una buena calibración de los sensores de



nivel utilizados. Las rectas de calibración de los sensores de Arduino (ver Figura 23) permiten obtener el nivel del volumen almacenado en los depósitos de acumulación. Una vez se ha conseguido dicho nivel ha sido posible calcular las restantes rectas de calibración (ver Figura 24) que sirven para realizar los hidrogramas de los caudales de filtración y de escorrentía superficial.

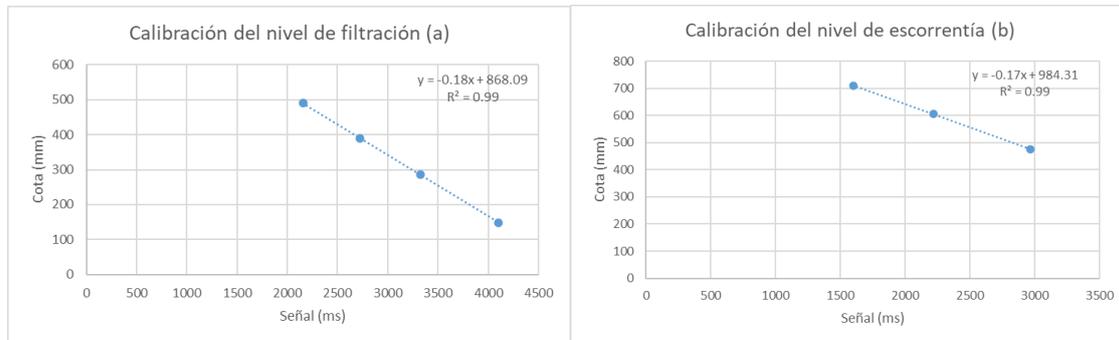


Figura 23. Rectas de calibración para los niveles de filtración (a) y escorrentía (b)

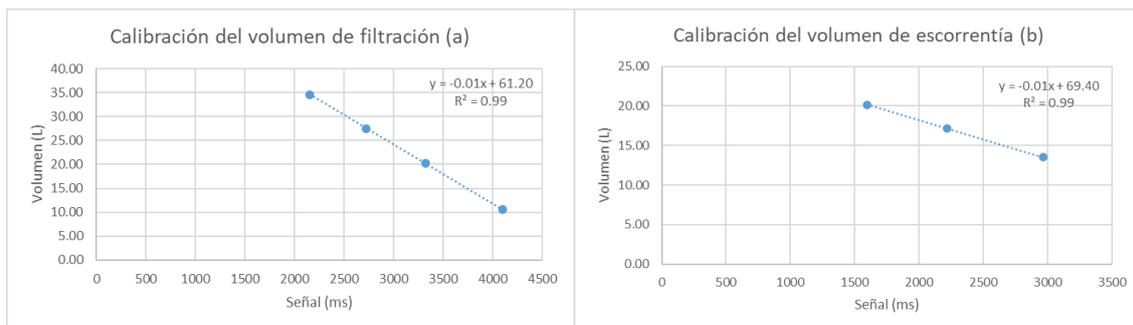


Figura 24. Rectas de calibración para los volúmenes de filtración (a) y escorrentía (b)

Se puede observar que para realizar estas calibraciones se han tomado hasta cuatro puntos de medición y que las ecuaciones obtenidas son muy similares tanto para el sensor colocado en el depósito de filtración como en el de escorrentía, algo lógico ya que son el mismo modelo de sensor de ultrasonidos. Además, las rectas obtenidas que contienen a dichos puntos tienen unos coeficientes de correlación de valor casi la unidad, lo que ejemplifica la buena calibración lograda.

Con estas calibraciones, debido a la sensibilidad de los sensores utilizados, los datos obtenidos de caudal iniciales presentan ciertas variaciones (ver Figura 25), por lo que se ha llevado a cabo el procesado y filtrado explicado en la metodología. Con estos primeros resultados ya se ha podido comprobar que su bajo coste implica también problemas en la variabilidad de los resultados.

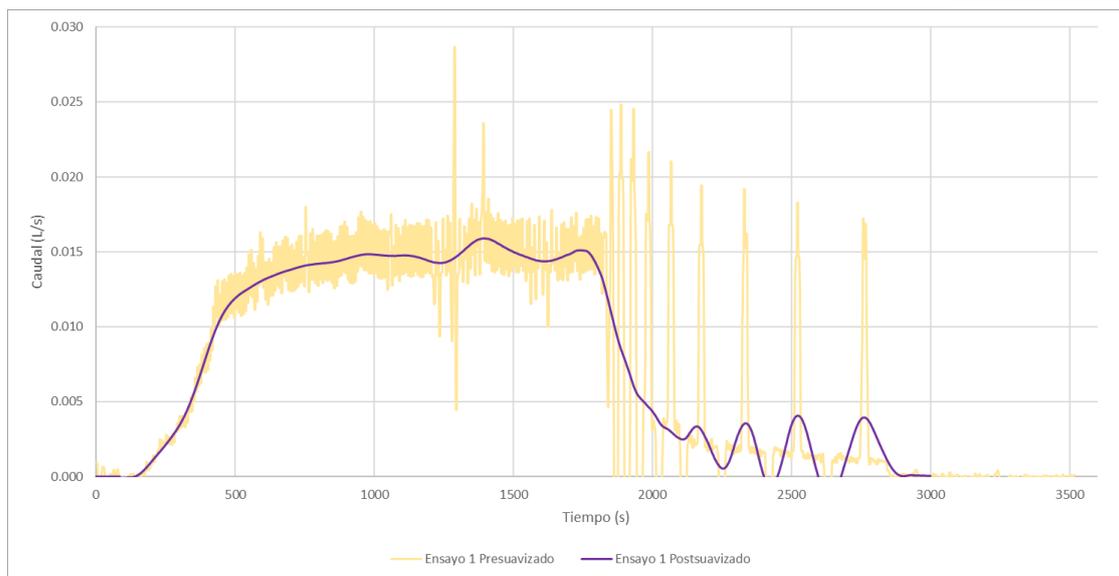


Figura 25. Ejemplo de procesado y filtrado en el Ensayo 1

5.2 Caracterización hidrológica con losas sin sedimento

A la hora de realizar el estudio del comportamiento hidráulico de las losas se ha comenzado por el análisis de la situación antes de la colmatación, para ello se ha analizado el comportamiento de la superficie impermeable y de las losas en el Ensayo 1 durante las lluvias ya descritas de 5, 10, 15 y 30 minutos para filtración (ver Figura 26), ya que con duraciones pequeñas los valores de escorrentía no son concluyentes. Se puede apreciar que en la superficie impermeable el inicio de la estabilidad del caudal es prácticamente el mismo, pues no se retiene volumen en ningún momento y se detecta caudal casi desde el instante 0 s, mientras que sobre los 100 s se estabiliza el caudal y solo comienza a reducirse al cortar el flujo de agua a los 5, 10, 15 o 30 minutos, el cual produce un descenso casi instantáneo del caudal hasta 0 L/s. Esto indica un mejor comportamiento en régimen permanente.

Por el contrario, al colocar las losas de firme permeable la situación cambia. Lo primero es que se retrasa el instante en que el volumen llega al depósito debido a que se retienen las precipitaciones en los poros de las losas, por lo que el caudal no se detecta hasta casi pasados 200 s. Además, antes la estabilización de dicho caudal se realizaba a los 100 s, mientras que ahora son necesarios casi 700 s para conseguirla. De hecho, con las intensidades de 5 y 10 minutos el cese del flujo de precipitaciones se produce antes de que se establezca el caudal.

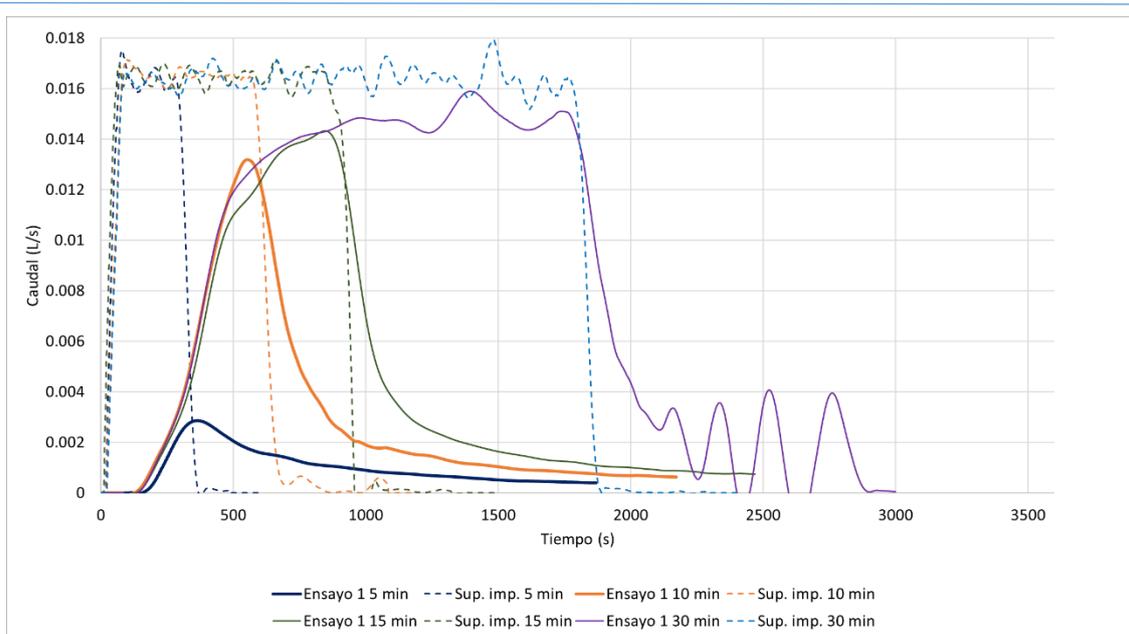


Figura 26. Comparación hidrogramas de Sup. imp y Ensayo 1 previa colmatación

También es destacable que el caudal punta alcanzado disminuye con respecto a la superficie impermeable, reduciéndose en los ensayos de 30, 15, 10 y 5 minutos un 11%, 16%, 19% y 82% respetivamente. Esto se debe al porcentaje de caudal acumulado en el Ensayo 1. Finalmente, en este caso, al cortar el flujo de caudal el descenso de este ya no es inmediato, sino que es gradual debido a que sigue fluyendo el volumen de agua retenido en las losas y en las geoceladas. Además, se han calculado los volúmenes de agua generados en los ensayos anteriores (ver Tabla 8), pudiéndose apreciar que a medida que aumenta la duración del ensayo (y se estabiliza el caudal) la diferencia porcentual entre la superficie impermeable y el DPS va disminuyendo drásticamente, con lo que se consigue un control de volúmenes destacable.

Tabla 8. Volumen generado y reducciones entre Sup. impermeable y Ensayo 1

Duración del ensayo	Volumen generado (L)		
	Superficie impermeable	Sistema DPS	Reducción porcentual
5 min	4.66	1.93	59%
10 min	9.61	6.54	32%
15 min	14.67	10.65	27%
30 min	29.22	24.05	18%



5.3 Caracterización de la retención y la colmatación del Dry Paving System

5.3.1 Reducción de la capacidad de infiltración

Como se comentó en la metodología, en el Ensayo 2 solo se realizaron estudios sin colmatar de 30 minutos, ya que las losas del DPS se suponen similares y esto se puede comprobar en la similitud de los hidrogramas del Ensayo 1 y del Ensayo 2 (ver Figura 27). Aun así, hay una pequeña diferencia en estos ensayos, la cual se puede ver a la hora del descenso de los hidrogramas. En estos se aprecia que en el primero el caudal desciende más rápido, por lo que se podría corroborar que tienen un mayor número de huecos. Este proceso se lleva a cabo como paso previo para conocer la situación antes de efectuar la colmatación de los poros.

En esta figura también se comparan las situaciones con sellado de juntas y se comprueba que prácticamente taponar estos orificios no afecta al flujo del caudal que transcurre hacia los depósitos. Esto se debe a la uniformidad de la lluvia que se reparte en una superficie mayoritariamente compuesta por las cuatro losas en comparación con los orificios existentes.

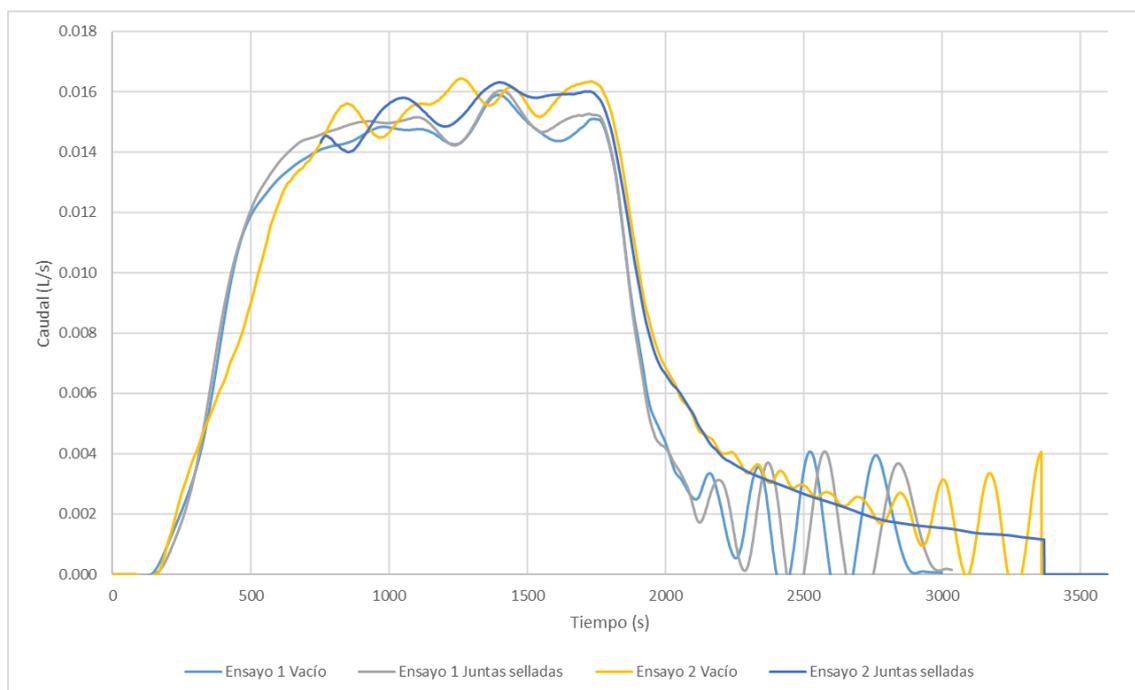


Figura 27. Hidrogramas de filtración de 30 min de duración previa colmatación

Cabe aclarar que se han realizado ensayos en los que se ha analizado la filtración y la escorrentía superficial con los dos depósitos y tolvas descritos en la metodología, pero una vez concluido el trabajo de campo se ha comprobado que en ningún momento se llegó a producir escorrentía superficial, ya que el firme nunca se saturó por completo. Los datos obtenidos en el depósito menor son debidos a goteos de lluvia y no a algún tipo de escorrentía, por lo que no se pueden considerar unos resultados demasiado coherentes y, como se acaba de exponer, los resultados no son concluyentes (ver Figura 28). Aun así, se puede apreciar que se sigue una continuidad en los hidrogramas que reflejan la cierta similitud de las losas.

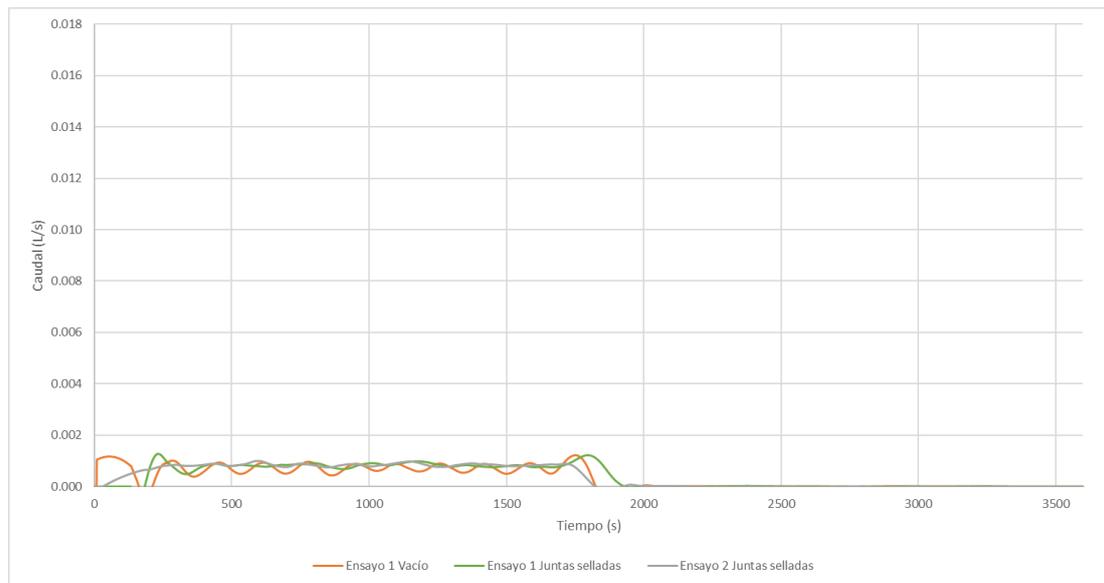


Figura 28. Hidrogramas de escorrentía de 30 min de duración previa colmatación

En el Ensayo 1, los estudios realizados con sedimentos de 250 a 500 μm han sido un total de 4, para conseguir una masa final vertida de 1 kg y así poder caracterizar la retención (ver Figura 29 y Figura 30). De este modo se puede deducir que el progresivo vertido de esta granulometría de sedimentos no produce cambios significativos en los hidrogramas, no retrasa el inicio de los mismos ni provoca variaciones a lo largo de los 60 minutos que dura la totalidad de la medición. Con esto se demuestra que el DPS funciona mejor de lo esperado antes de ensayar con el y que verter este sedimento, a nivel hidráulico y de filtración, no afecta al firme. En cuanto al sellado de las juntas, igual que en el caso previo a la colmatación, parece no tener ningún efecto destacable en cuanto al comportamiento del agua a través del firme.

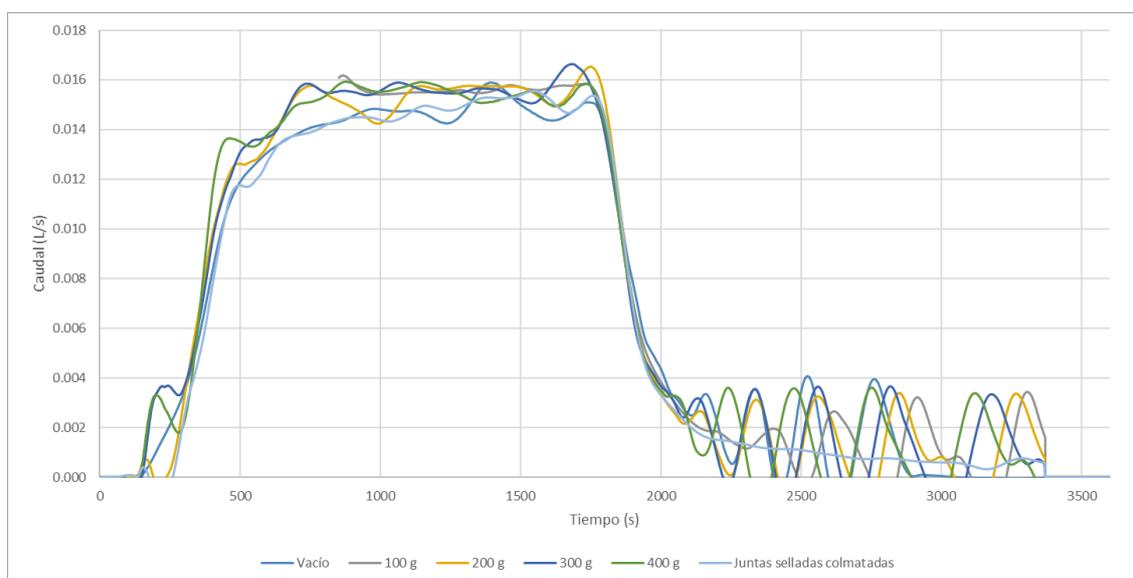


Figura 29. Hidrogramas de filtración del Ensayo 1 colmatado

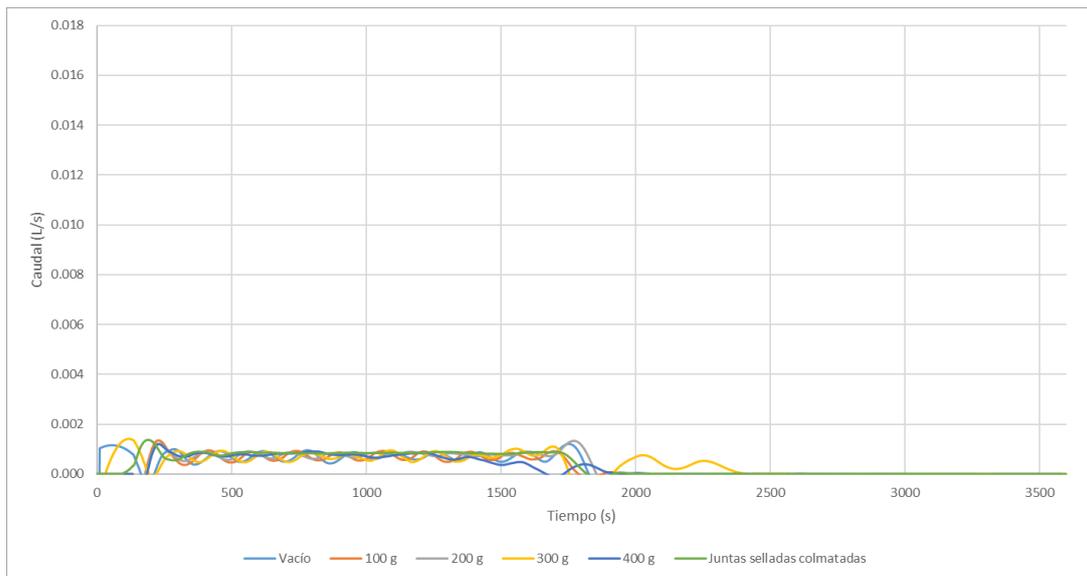


Figura 30. Hidrogramas de escorrentía del Ensayo 1 colmatado

En relación a la colmatación del Ensayo 2, debida al sedimento de 63 a 125 μm , se puede observar que se produce un caso similar al anterior (ver Figura 31 y Figura 32). A pesar de esperarse una reducción del flujo de caudal antes de realizar los ensayos, los hidrogramas debidos al vertido sucesivo del sedimento arrojan unos resultados en los que apenas se producen variaciones. Los hidrogramas, una vez selladas las juntas, se comportan también de forma análoga a lo ya analizado. Con esto se puede confirmar que, con los dos sedimentos utilizados, el sistema DPS no llega a saturarse y sigue manteniendo un comportamiento hidráulico similar al inicial.

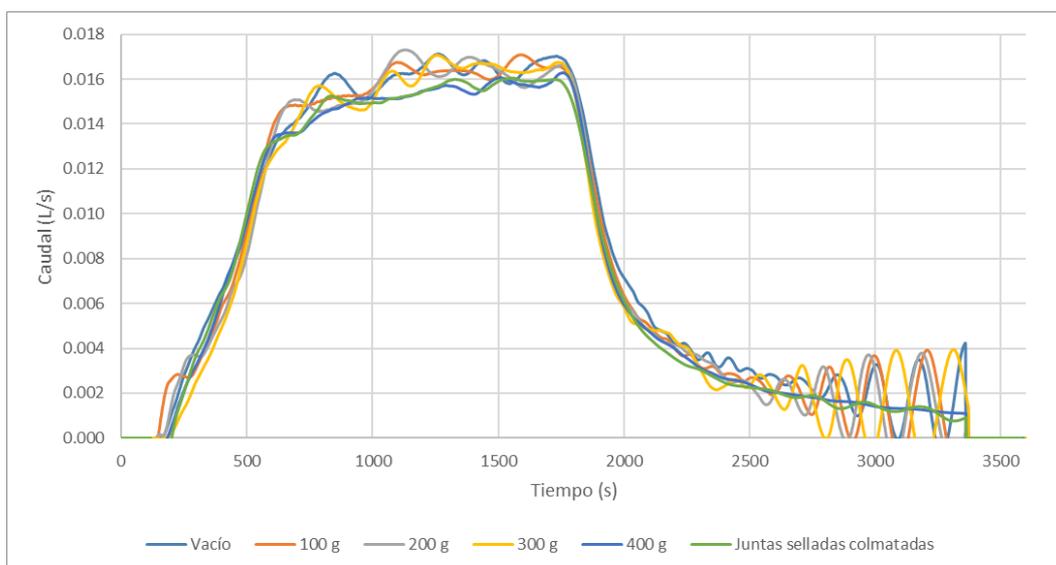


Figura 31. Hidrogramas de filtración del Ensayo 2 colmatado

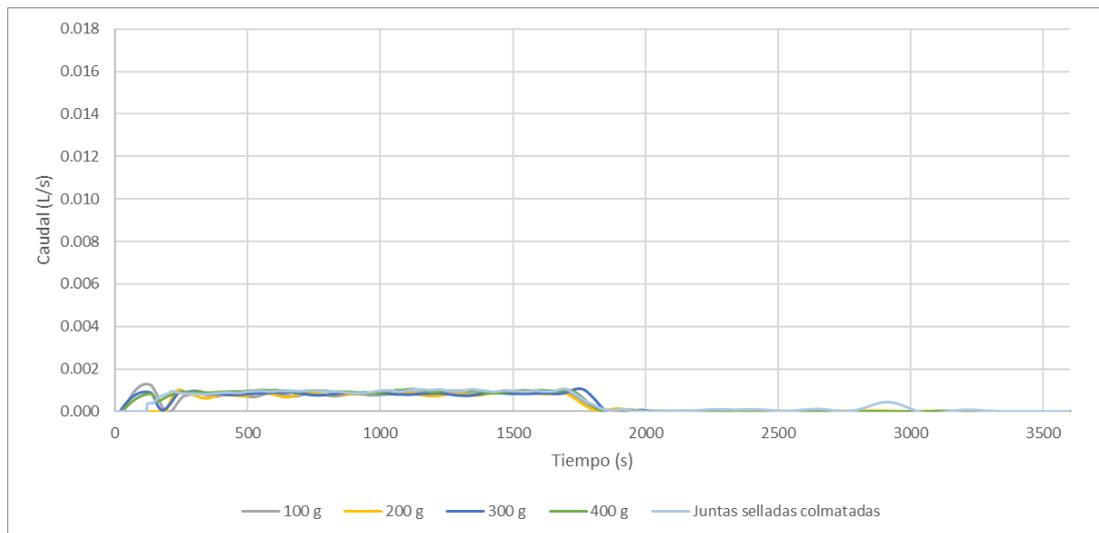


Figura 32. Hidrogramas de escorrentía del Ensayo 2 colmatado

5.3.2 Efecto de la limpieza

Al efectuar la limpieza en el Ensayo 1 mediante un aspirado de la superficie (ver Figura 33 y Figura 34) se obtienen los resultados esperables una vez estudiada la dinámica anterior. Se consigue recuperar parte del sedimento acumulado en los poros, pero esto no afecta prácticamente a la distribución de los hidrogramas. En el Ensayo 2 el sedimento es de 63 a 125 μm y sucede lo mismo que en el resto de casos, ya que los caudales no se ven afectados por la inclusión del sedimento y el comportamiento es prácticamente igual que antes de efectuar el vertido.



Figura 33. Hidrogramas de filtración de los Ensayos 1 y 2 post aspirado

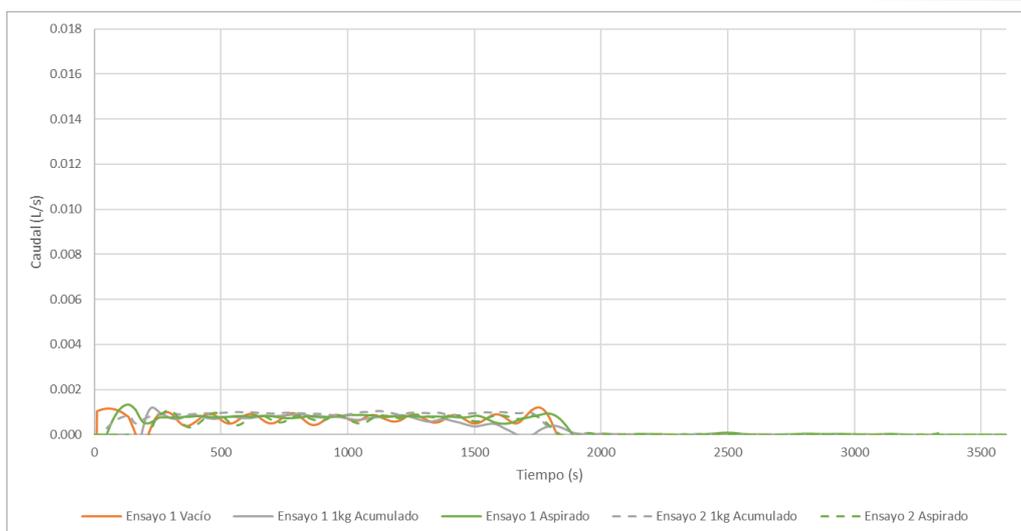


Figura 34. Hidrogramas de escorrentía de los Ensayos 1 y 2 post aspirado

5.3.3 Análisis de la permeabilidad

Una vez analizados los diferentes hidrogramas de los ensayos se ha continuado con el estudio de la permeabilidad del sistema DPS. Comenzando por los resultados del Ensayo 1, en el estado inicial de vacío del DPS, se han obtenido unas permeabilidades iniciales del entorno de 100000 mm/h en la cruceta, de 40000-50000 mm/h en las juntas y de 3000-45000 mm/h en los centros de las losas. Una vez se ha vertido el total del sedimento (1 kg) se ha visto reducida su capacidad de infiltración en hasta un 86% (ver Tabla 9), siendo mucho menor esta disminución en las zonas abiertas como las juntas y la cruceta. Con esto se comprueba que esta tipología de sedimento produce una gran pérdida de la función filtrante de este firme, afectando a su capacidad de filtración de agua en casi un 90%.

Posteriormente, se procedió a limpiar las losas mediante un aspirado superficial del sedimento acumulado consiguiéndose una recuperación de la permeabilidad del entorno del 10% en los centros de losa y casi nula en juntas y cruceta. Esto último es debido a que en estas dos zonas el sedimento permanece acumulado en el geotextil y el aspirado no elimina prácticamente ninguna partícula. Se puede apreciar que la recuperación mediante un aspirado con esta tipología de sedimento es pequeña en términos absolutos, aunque relativamente se recupera un 50% de la permeabilidad, ya que se pasa del entorno de 500 mm/h al de 1000 mm/h.

Tabla 9. Resultados de permeabilidad del Ensayo 1

Zona	Punto	Coef. Perm. (mm/h) Vacío	Coef. Perm. (mm/h) 1 kg 250µm	Variación respecto vacío	Coef. Perm. (mm/h) Aspirado	Variación respecto vacío
Cruceta	5	100614	96436	-4%	98486	-2%
	2	46139	40710	-12%	41960	-9%
Junta	4	38168	30684	-20%	32365	-15%
	6	51873	41098	-21%	40903	-21%
	8	49890	48122	-4%	53068	6%
Losa	1	3283	455	-86%	910	-72%
	3	2893	490	-83%	607	-79%
	7	4320	598	-86%	1013	-77%
	9	4441	797	-82%	1221	-73%



En el Ensayo 2 se han obtenido unas permeabilidades iniciales muy similares a las del Ensayo 1, algo comprensible al tratarse de losas de la misma tipología y del mismo fabricante, por lo que la posible heterogeneidad en la construcción parece que no afecta demasiado en este aspecto. Una vez colmatadas completamente (con 1 kg) la capacidad de infiltración se ha visto reducida en hasta un 42% (ver Tabla 10), menos de la mitad que con el sedimento más grueso (86% de reducción máxima). Como antes, la reducción no es tan significativa en las zonas con aberturas. En este sentido, la disminución de la permeabilidad no daña tanto a la capacidad filtradora de este firme por lo que parece que se comporta mejor ante este tipo de ataques externos.

Una vez llevada a cabo la limpieza, se consigue una recuperación de la permeabilidad del entorno del 20% en las zonas del centro de la losa, para tener finalmente una pérdida de capacidad filtrante del 11-24% en estos puntos, un valor bastante pequeño y admisible debido al tipo de firme que se analiza y mucho menor que con el sedimento anterior que provocaba pérdidas del 72-79%. Cabe aclarar, que, en los centros de la losa, debido a la variabilidad en las mediciones del tiempo de espera de la permeabilidad, hay un punto (el 3) en el que al aspirar se consigue una permeabilidad superior incluso a antes de la colmatación, algo que no tiene sentido y se debe a un posible error en dicha medición. Esto puede deberse a que este error se cometió en el momento de la colocación del permeámetro, ya que una pequeña variación de la posición descrita en la metodología puede implicar variaciones considerables en la permeabilidad.

Tabla 10. Resultados de permeabilidad del Ensayo 2

Zona	Punto	Coef. Perm. (mm/h) Vació	Coef. Perm. (mm/h) 1 kg 63µm	Variación respecto vacío	Coef. Perm. (mm/h) Aspirado	Variación respecto vacío
Cruceta	5	109265	114478	5%	108554	-1%
	2	48208	45355	-6%	43853	-9%
Junta	4	46460	51293	10%	50258	8%
	6	36200	41492	15%	38748	7%
	8	38924	39708	2%	38054	-2%
Losa	1	4148	2915	-30%	3680	-11%
	3	1963	1495	-24%	2034	4%
	7	2926	1944	-34%	2313	-21%
	9	2299	1328	-42%	1745	-24%

Finalmente, y a modo de resumen, se han analizado las medias de la permeabilidad y las desviaciones típicas en centros de losa y en juntas para así poder tener una idea más clara del comportamiento en este ámbito. Como era de suponer una vez conocidos los resultados generales, con el promedio y la desviación se puede entender que el sedimento más grueso afecta más perjudicialmente que el fino (ver Tabla 11). Además, también como recapitulación, se muestra un gráfico donde se comparan estas permeabilidades (ver Figura 35) y que permite dilucidar la gran diferencia existente entre losas y juntas.



Tabla 11. Resumen de la permeabilidad promedio y de la desviación estándar

	Medidas permeámetro LCS (mm/h)					
	Promedio en losas (desv. est.)			Promedio en juntas (desv. est.)		
	Vacío	Cargado	Tras aspirar	Vacío	Cargado	Tras aspirar
Ensayo 1	3734 (764)	585 (154)	938 (256)	46518 (6053)	40153 (7173)	42074 (8496)
Ensayo 2	2834 (963)	1920 (712)	2443 (857)	42488 (5794)	44462 (5128)	42728 (5647)

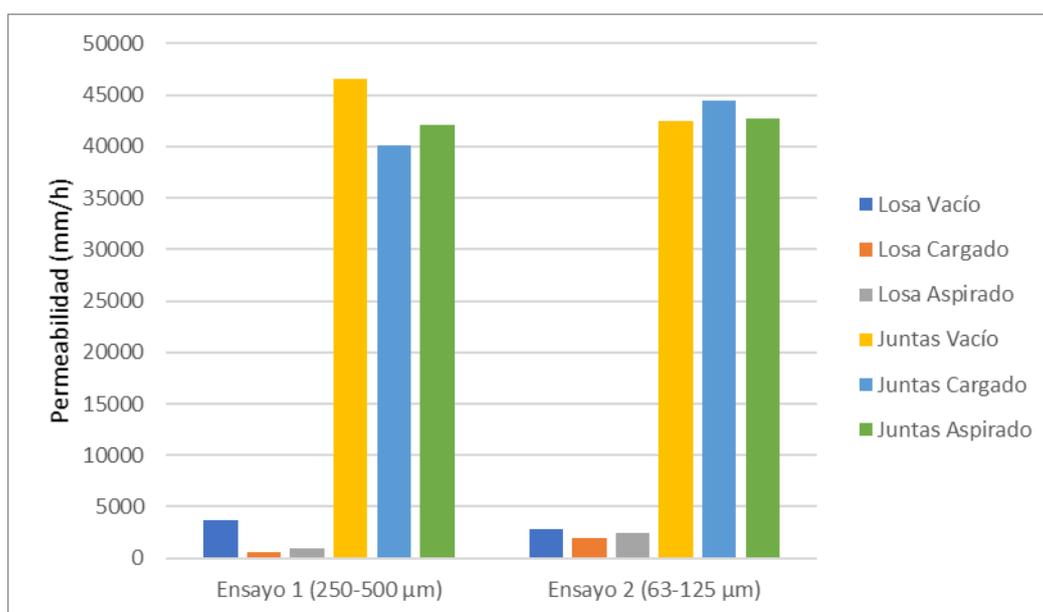


Figura 35. Resumen gráfico de la permeabilidad promedio

Para el análisis de la permeabilidad realizado mediante el sensor de burbujas se muestra primero una comparación de dos medidas en un mismo punto antes de colmatar (ver Figura 36). Esta parte ha sido explicada en el apartado de metodología y con los resultados se confirma lo ya mencionado que justifica comenzar a realizar una única medición con el permeámetro LCS (en vez de las dos recomendadas por la norma), ya que los tiempos de las dos medidas con prácticamente idénticos. En esta figura también puede apreciarse de un modo sencillo el aumento del tiempo de descenso del volumen de agua a medida que se colmata el firme y la recuperación relativa del 50% del Ensayo 1 comentada anteriormente.

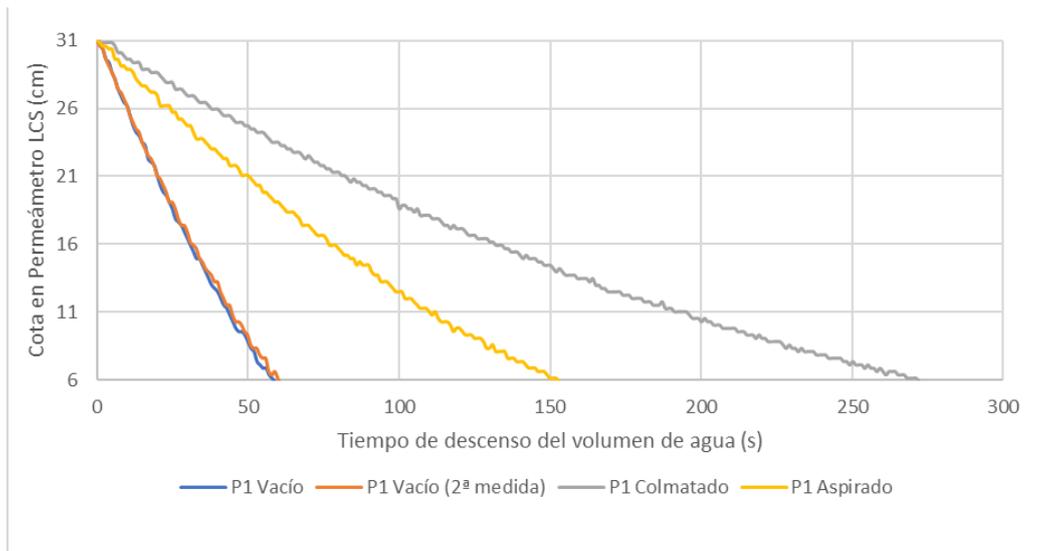


Figura 36. Comparación de medidas con Hach Sigma 950 en el Punto 1 en el Ensayo 1

Con este sensor se ha procedido a un análisis de la permeabilidad realizado en paralelo al del LCS y donde se puede comprobar lo ya explicado en los párrafos anteriores y visto más en detalle en la figura anterior. En el Ensayo 1 (ver Figura 37) se puede apreciar que la gráfica se divide en tres zonas, correspondientes con las medidas en vacío (sobre 50 s), aspirado (sobre 150 s) y colmatado (sobre 250 s) para los puntos en centro de losa, mientras que los puntos en cruceta y juntas se acumulan en el entorno de los 5 s.

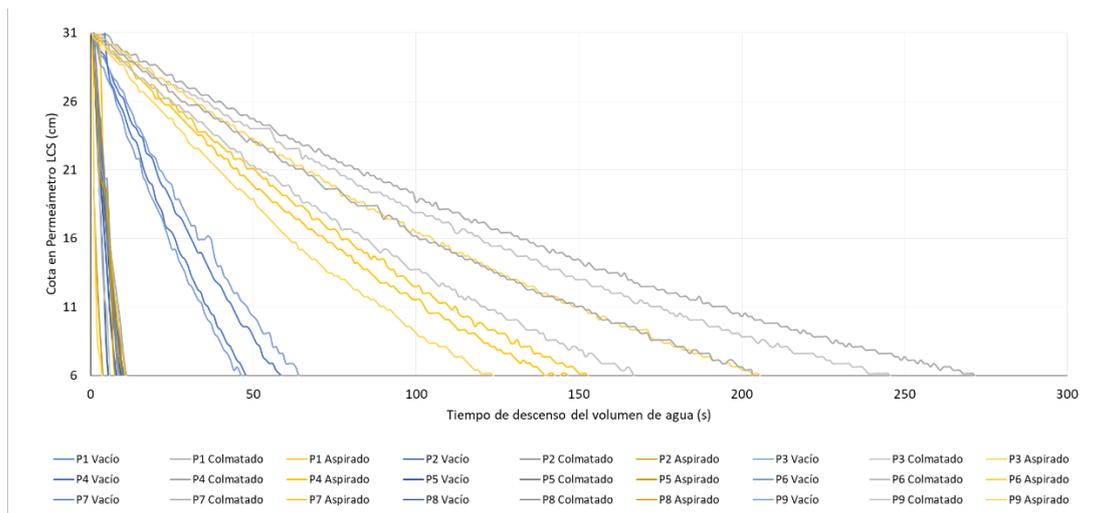


Figura 37. Resultados del Sensor de Burbujas en el Ensayo 1

En el caso del Ensayo 2, los resultados son análogos a los anteriores (ver Figura 38), pero con un tiempo de descenso del volumen de agua bastante menor que con el sedimento grueso. En este caso la gráfica se divide en tres grupos menos diferenciados debido a la menor diferencia entre la losa colmatada y la losa previo vertido de sedimento.

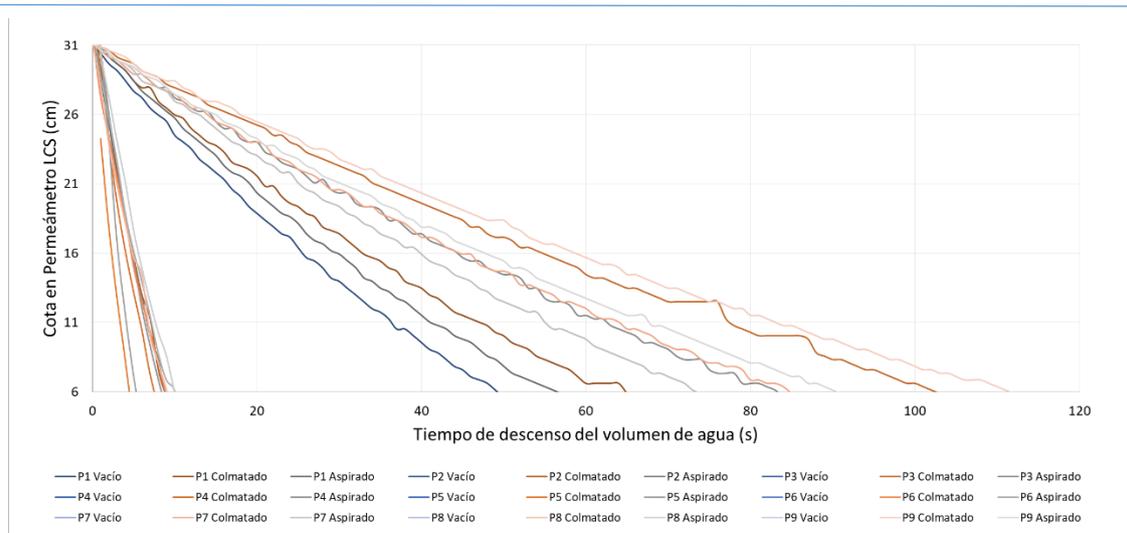


Figura 38. Resultados del Sensor de Burbujas en el Ensayo 2

5.3.4 Balance de masas

Por último, a la hora de proceder al desmontaje necesario para realizar el balance de masas, se han podido observar ciertas diferencias entre el Ensayo 1 y el 2. En el primero se puede distinguir que el sedimento casi no ha traspasado al geotextil (ver Figura 39) ni se ha visto acumulado en los poros. Esto se confirma en el propio balance, donde un porcentaje importante es masa aspirada en superficie. En lo que respecta al Ensayo 2 (ver Figura 40), en las que se ha usado un sedimento de menor granulometría, las propias manchas en el geotextil indican que se ha filtrado una mayor cantidad de sedimento. Además, al ser más fino se confirma que se ha ido filtrando por los poros y que en las zonas de mayor caudal (donde se ha colocado el Permeámetro LCS) se ha visto movilizado en mayor medida que en otras áreas.

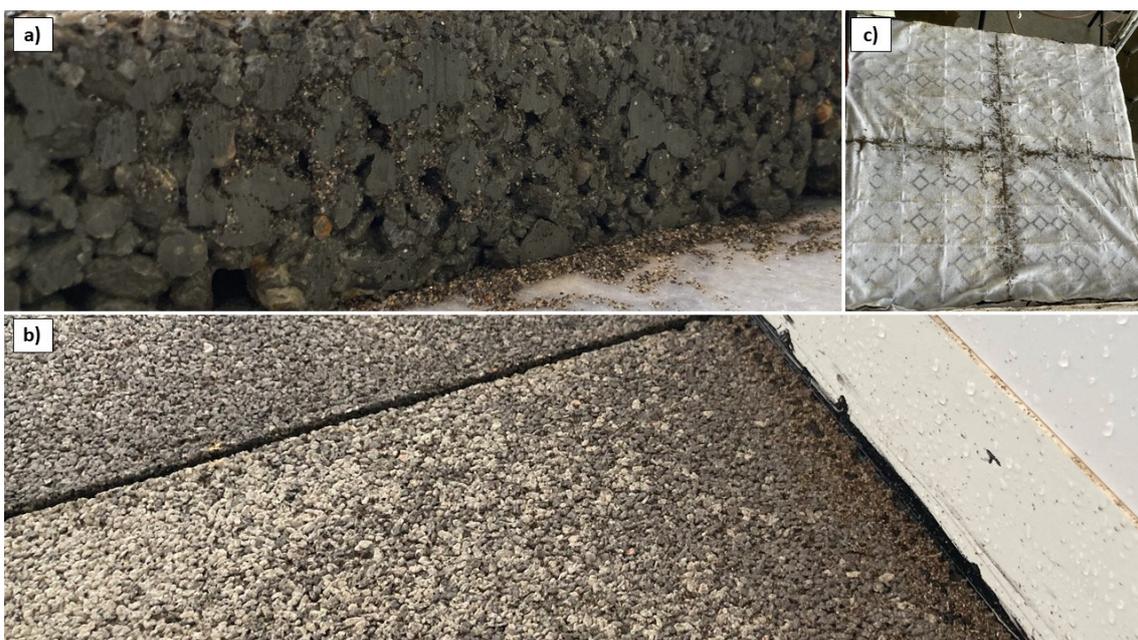


Figura 39. Situación del Ensayo 1 al final del proceso. a) Junta. b) Geotextil. c) Superficie

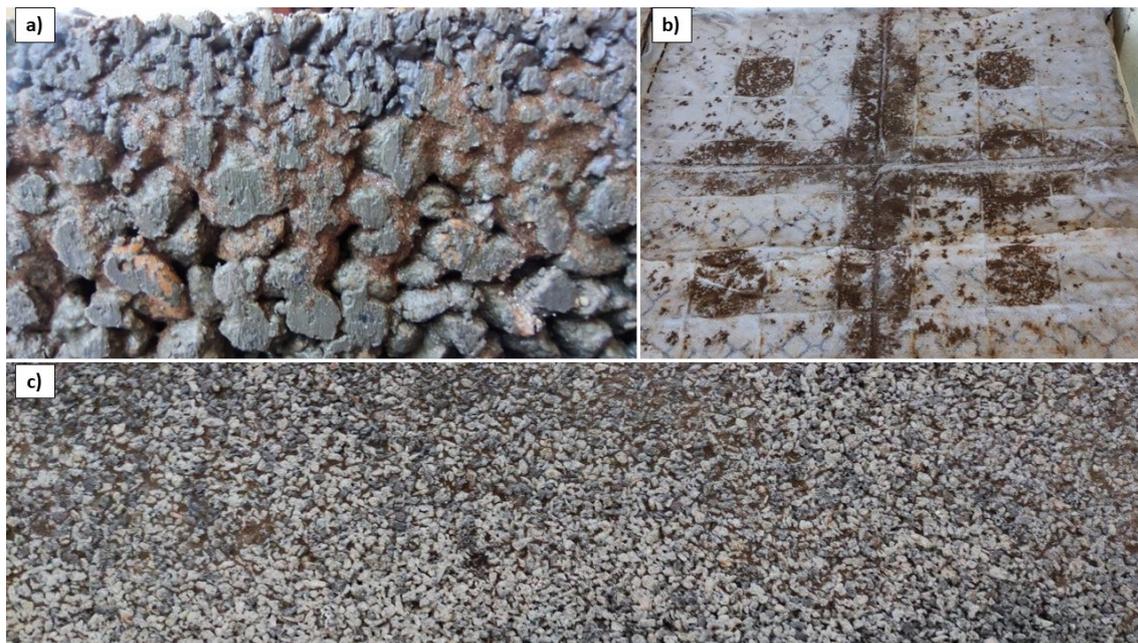


Figura 40. Situación del Ensayo 2 al final del proceso. a) Junta. b) Geotextil. c) Superficie

Finalmente se ha calculado el balance de masas de las dos granulometrías de sedimento utilizadas tal y como se muestra en la Tabla 12. Se puede apreciar que prácticamente se produce una distribución similar del sedimento entre la superficie y lo acumulado en los poros del Ensayo 1. De hecho, la cantidad de sedimento retenida en los poros es de aproximadamente el 50% (ver Figura 41), mientras que en el Ensayo 2 ronda el 90%, pero en cambio, la permeabilidad se ve reducida de manera inversa. Con esto se deduce que la reducción de dicha permeabilidad se debe en mayor medida a un colapso de los poros superiores más que a la saturación interna producida por el sedimento. Es necesario aclarar que estos valores son calculados considerando que la carga total es de 1000 g (1 kg).

Tabla 12. Balance de masas realizado en los diferentes ensayos

	Ensayo 1 (g)	Ensayo 2 (g)
Masa inicial distribuida	1000,0	1000,0
Masa aspirada en superficie	426,6	1,2
Masa retenida en geotextil	32,0	46,1
Masa aspirada en geocelda	0,0	22,4
Masa aspirada en depósito de escorrentía	27,7	11,6
Masa retenida en losa	513,7	918,17

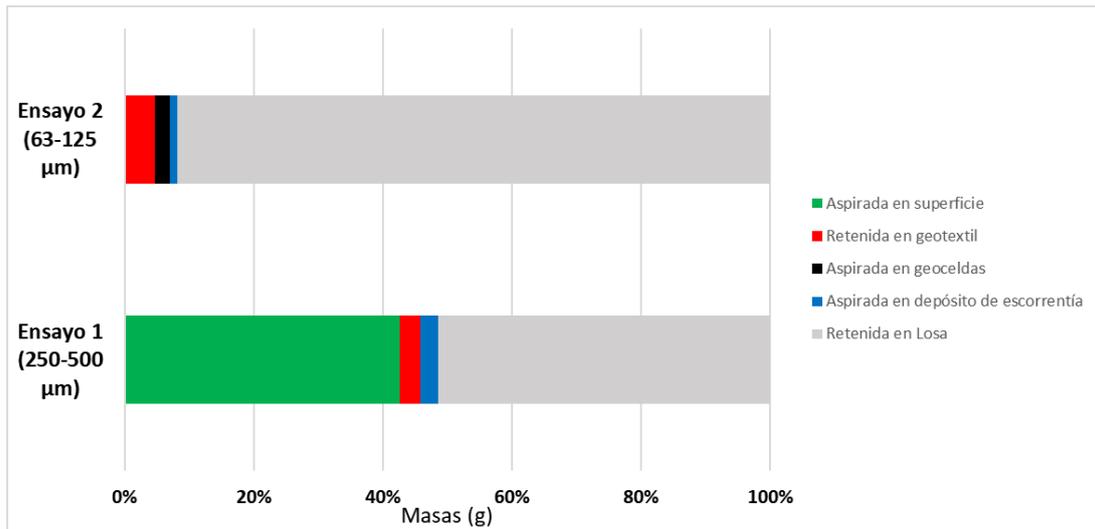


Figura 41. Balance porcentual de masas de los Ensayos 1 y 2



6 Conclusiones y líneas de investigación futuras

A lo largo de este Proyecto Técnico se ha ido presentando el proceso llevado a cabo para poder estudiar el comportamiento de un paquete de losas de hormigón poroso con juntas con el fin de poder esclarecer el buen funcionamiento de este tipo de SUDS y sus posibles aplicaciones frente a otras técnicas tradicionales de drenaje urbano. Para ello se han realizado dos grupos principales de ensayos con dos paquetes de losas ecoDraininig. Estos ensayos han sido llevados a cabo en un simulador de lluvia construido para tal efecto y se han basado en analizar el comportamiento hidráulico y la permeabilidad antes y después de provocar una colmatación de los poros de dichas losas.

El montaje experimental del simulador de lluvia, finalmente nombrado MEDUSA 7, ha resultado ser bastante exitoso debido a los buenos resultados en relación a la uniformidad de la lluvia generada obtenidos. Además, la construcción por módulos ideada para este simulador hace posible una fácil modificación futura si fuera necesario dependiendo de las necesidades de proyectos futuros. En relación a los sensores, se han utilizado un conjunto de sensores de ultrasonidos que junto con la disposición del Arduino han permitido obtener los datos de caudales. Este grupo de sensores se utilizaron en un inicio como una posible alternativa a aparatos de mayor coste, pero se ha llegado a la conclusión de que no funcionan correctamente y producen muchos errores ajenos a los ensayos, sobre todo debidos a la humedad de la ubicación donde se deben colocar. Por lo tanto, para siguientes proyectos sería recomendable utilizar otro tipo de sensores.

En el estado de análisis previo a los ensayos se esperaba que se produjera una saturación de los poros debido a la colmatación de los mismos que diese lugar a una escorrentía superficial, por ello se colocaron las tolvas y depósitos correspondientes de flujo superficial. Una vez realizados los ensayos se pudo comprobar que nunca llegó a producirse escorrentía superficial ni siquiera con el vertido final de 1 kg de sedimento, algo esperable debido a los otros estudios referenciados en el estado del arte, los cuales no llegaban a saturar los firmes ni con 2kg de sedimento. Con este comportamiento puede afirmarse que el firme es capaz de almacenar una gran cantidad de sedimento sin que su función principal de filtrado se vea afectada peligrosamente y produzca una lámina de agua superficial que pueda provocar cierto grado de inundabilidad en las superficies donde se vayan a instalar.

En comparación con la superficie impermeable estudiada que simularía un firme tradicional impermeable urbano, el sistema DPS presenta unas reducciones considerables de los caudales punta en los ensayos realizados. Este hecho implica un buen comportamiento frente a periodos adversos de altas intensidades de lluvias que permitirían conseguir una menor afección de los sistemas colectores de lluvias urbanos, con la consecuente reducción de costes derivada de dicha saturación. Además, como se ha comprobado en los resultados, el hecho de provocar una saturación mediante la colmatación de los poros no afecta a la capacidad infiltradora de estos firmes. Este hecho es toda una ventaja ya que implica un comportamiento hidráulico casi idéntico recién estrenado y tras varios meses de uso, lo que deriva en un flujo de caudal similar a lo largo de su vida útil. Además, también se ha podido comprobar que el hecho de sellar las juntas no afecta a su comportamiento hidráulico, por lo que un posible taponamiento una vez en uso no sería demasiado perjudicial.



Aun así, a pesar de que hidráulicamente no se ve reducida la capacidad de infiltración, estas losas si ven mermada su permeabilidad. Con un sedimento grueso de 250-500 μm se reduce esta permeabilidad en un 85%, mientras que con un sedimento fino de 63-125 μm esta disminución es del 30%. Esto supone un problema a la hora del mantenimiento de los firmes, ya que en el caso del sedimento grueso el aspirado superficial solo consigue recuperar un 10% de la permeabilidad, por lo que deberían introducirse otras técnicas de limpieza a parte de la ya estudiada limpieza superficial.

En relación con el sedimento retenido, se ha llegado a la conclusión de que la tipología gruesa queda retenida en buena medida en la superficie de las losas debido a que el diámetro de diseño de los poros no permite su paso al interior más que en un 50%. Por el contrario, el sedimento fino consigue traspasar la superficie del firme y queda retenido hasta en un 90% en sus poros. Además, se puede concluir que la colmatación superficial tiene un mayor efecto negativo en la permeabilidad que la propia colmatación interna de los poros, pues el sedimento grueso acumulado en superficie ha provocado una disminución de la permeabilidad mayor que el fino acumulado internamente.

Como apunte final se puede asegurar que esta tipología de losas permeables con juntas son una muy buena tipología de SUDS y una excelente alternativa en zonas urbanas con poca densidad de tráfico a otros firmes impermeables comúnmente usados. Su fácil montaje y desmontaje, su sencilla limpieza y su alta capacidad para acumular sedimento sin ver demasiado afectado su comportamiento hidráulico las convierten en una excelente herramienta para conseguir una menor afección al ciclo natural del agua en entornos urbanos.

Con el montaje de este simulador y el comienzo del estudio de firmes permeables se inicia una línea de trabajo en la que se podrán ver enmarcados futuros proyectos que necesiten el uso del MEDUSA 7 para el análisis del comportamiento de diferentes tipologías de pavimentos que pueden ser susceptibles de ser implementados en entornos metropolitanos. De este modo, es interesante el estudio de este mismo DPS con otras franjas granulométricas para poder analizar su comportamiento o incluso el análisis de su resistencia a la congelación y de cómo esta afecta a la permeabilidad. Además, con este minisimulador se podrán colocar otro tipo de firmes ya sean permeables o impermeables y así iniciar proyectos de investigación con empresas del sector a las que poder solicitar ensayos de sus productos. También será posible estudiar la limpieza de los firmes permeables futuros con otras técnicas diferentes al aspirado superficial como puede ser un lavado mediante agua a presión y su estudio con pendientes mayores al 2% de este Proyecto. Asimismo, implícitamente, también se verían enmarcados los proyectos que analizaran las ventajas de implementar técnicas SUDS frente a otras técnicas tradicionales de drenaje urbano.



Bibliografía

- Alsubih, M., Arthur, S., Wright, G. y Allen, D. (2017). Experimental study on the hydrological performance of a permeable pavement. *Urban Water Journal*, 14 (4), 427-434. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1176221>
- Andrés-Doménech, I., Anta, J., Perales-Momparler, S. y Rodríguez-Hernández, J. (2021). Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis. *Sustainability* 2021, 13 (5), 2791. <https://doi.org/10.3390/su13052791>
- Andrés-Valeri, V., Juli-Gandara, L., Jato-Espino, D y Rodríguez-Hernández, J. (2018). Characterization of the Infiltration Capacity of Porous Concrete Pavements with Low Constant Head Permeability Tests. *Water* 2018, 10 (4), 480. <https://doi.org/10.3390/w10040480>
- Anta, J., Suárez, J., Puertas, J., Temprano, J. y Cagiao, J. (2008). Capítulo 11: Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible en Sistemas Separativos. *Gestión de las aguas pluviales: implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.
- A.R.C. (2001). Georgia Stormwater Management Manual. Volume 2: Technical Handbook. Atlanta Regional Commission. Atlanta, Georgia, Estados Unidos.
- Castro-Fresno, D., Rodríguez, J., Rodríguez-Hernández, J. y Ballester-Muñoz, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia*, Vol. 30, Nº 5.
- Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V. C., Sañudo-Fontaneda, L. A. y Rodríguez-Hernández, J. (2013). Sustainable Drainage Practices in Spain, Specially Focused on Pervious Pavements. *Water* 2013, 5 (1), 67-93. <https://doi.org/10.3390/w5010067>
- Cervigni, M. G. (1993). Systems to Control and Treat the CSOs. Optimization of the binomial Tank-Decanter. Tesis de Máster, Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- Christiansen, J. (1942). Irrigation by Sprinkling, Nº 04. Agricultural Experiment Station, University of California, Berkeley, California, Estados Unidos.
- Drake, J. y Bradford, A. (2013). Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. *Water Science & Technology* 2013, 68 (9), 1950-1958. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.450>
- Ferguson, B. (2005). Porous Pavements. Taylor & Francis, Nueva York, Estados Unidos.
- Gunderson, J. (2008). Pervious Pavements: New Findings about Their Functionality and Performance in Cold Climates. *Stormwater Magazine*, septiembre 2008.
- Hernández-Crespo, C., Fernández-Gonzalvo, M., Martín, M. y Andrés-Doménech, I. (2019). Influence of rainfall intensity and pollution build-up levels on water quality and quantity response of permeable pavements. *Science of The Total Environment*, 684, 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.271>
- Kayhanian, M. Anderson, D., Harvey, J., Jones, D. y Muhunthan, B. (2012). Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking



lots. *Journal of Environmental Management*, 95 (1), 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021>

Kia, A., Wong, S. y Cheeseman, C. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>

Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., Zhang, H. y Granato, T. (2016). In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - a four-year study. *Journal of Environmental Management*, 167, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.019>

Mata, L. (2008). Sedimentation of Pervious Concrete Pavement System. PhD. Thesis. University of North Carolina, Chapel Hill, Carolina del Norte, Estados Unidos.

Naves, J., Anta, J., Suárez, J. y Puertas, J. (2020). Development and Calibration of a New Dripper-Based Rainfall Simulator for Large-Scale Sediment Wash-Off Studies. *Water* 2020, 12 (1), 152. <https://doi.org/10.3390/w12010152>

NLT-327/88. (1988). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España.

Ordóñez, A., Álvarez, R., De Miguel, E. y Charlesworth, S. (2015). Spatial and temporal variations of trace element distribution in soils and street dust of an industrial town in NW Spain: 15 years of study. *Science of The Total Environment*, 524-525, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.024>

Perales-Momparler, S. y Andrés-Doménech, I. (2007). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia. *Equipamiento y servicios municipales*, 133, 66-77.

Puertas, J., Suárez, J., y Anta, J. (2008). Capítulo 1: Diseño de Sistemas de Saneamiento y Drenaje: Nuevos Objetivos y Conceptos. *Gestión de las aguas pluviales: implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.

Razzagmanesh, M y Beechman, S. (2018). A Review of Permeable Pavement Clogging Investigations and Recommended Maintenance Regimes. *Water* 2018, 10 (3), 337. <https://doi.org/10.3390/w10030337>

Rodríguez-Rojas, M., Huertas-Fernández, F., Moreno, B., Martínez G. y Grindlay, A. (2018). A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: A case study in the south of Spain. *Journal of Environmental Management*, 205, 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.075>

Sañudo-Fontaneda, L., Rodríguez-Hernández, J., Vega-Zamanillo, A. y Castro-Fresno, D. (2012). Laboratory Analysis of the Infiltration Capacity of Interlocking Concrete Block Pavements in Car Parks. *Water Science & Technology* 2013, 67 (3), 675-681. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.614>

Sañudo-Fontaneda, L., Rodríguez-Hernández, J., Calzada-Pérez, M. y Castro-Fresno, D. (2013). Infiltration Behaviour of Polymer-Modified Porous Concrete and Porous Asphalt Surfaces Used in SuDS techniques. *Clean Soil Air Water*, 42 (2), 139-145. <https://doi.org/10.1002/clen.201300156>



Temprano, J., Suárez, J., Puertas, J. y Anta, J. (2008). Gestión de las aguas pluviales: implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano. Capítulo 9: Las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.

Tennis, P., Leming, M. y Akers, D. (2004). Pervious Concrete Pavements. *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, Estados Unidos.

Woods-Ballard, W., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., y Shaffer, P. (2015). *The SUDS Manual*. CIRIA, Londres, Inglaterra, Reino Unido.



Índice de Figuras

Figura 1. Sección tipo de un pavimento poroso (A.R.C., 2001).....	6
Figura 2. Simulador de lluvia portátil (Hernández-Crespo et al., 2019).....	10
Figura 3. Permeámetro de carga constante (Andrés-Valeri et al., 2018)	10
Figura 4. Aparcamiento y pavimentos usados en el Campus de Cartuja (Rodríguez-Rojas et al., 2018)	11
Figura 5. Pavimentos permeables en el parque de La Guía (Castro-Fresno et al., 2013)	12
Figura 6. Fase previa del simulador.....	16
Figura 7. Detalle explicativo del simulador de lluvia con el módulo ensayado	17
Figura 8. Módulo de ensayos superior.....	17
Figura 9. Módulos de ensayos intermedio e inferior	18
Figura 10. Detalle del sistema Dry Paving System	19
Figura 11. Sensor de ultrasonidos HC-SR04	20
Figura 12. Montaje del sensor de ultrasonidos HC-SR04.....	20
Figura 13. Posición del sensor de ultrasonidos en el depósito de infiltración.....	21
Figura 14. Permeámetro LCS.....	22
Figura 15. Distribución de puntos de ensayo del permeámetro	23
Figura 16. Sensor de burbujas Hach Sigma 950	24
Figura 17. Medición de la uniformidad de las precipitaciones	24
Figura 18. Precipitación de 80 mm/h en la losa permeable	26
Figura 19. Caracterización granulométrica de sedimentos utilizados	27
Figura 20. Tamizador utilizado para la distribución del sedimento	29
Figura 21. Proceso de aspiración de sedimentos.....	29
Figura 22. Mapa de distribución de lluvias para intensidad de 80 mm/h.....	31
Figura 23. Rectas de calibración para los niveles de filtración (a) y escorrentía (b).....	32
Figura 24. Rectas de calibración para los volúmenes de filtración (a) y escorrentía (b)	32
Figura 25. Ejemplo de procesado y filtrado en el Ensayo 1	33
Figura 26. Comparación hidrogramas de Sup. imp y Ensayo 1 previa colmatación	34
Figura 27. Hidrogramas de filtración de 30 min de duración previa colmatación.....	35
Figura 28. Hidrogramas de escorrentía de 30 min de duración previa colmatación.....	36
Figura 29. Hidrogramas de filtración del Ensayo 1 colmatado	36
Figura 30. Hidrogramas de escorrentía del Ensayo 1 colmatado.....	37
Figura 31. Hidrogramas de filtración del Ensayo 2 colmatado	37
Figura 32. Hidrogramas de escorrentía del Ensayo 2 colmatado.....	38
Figura 33. Hidrogramas de filtración de los Ensayos 1 y 2 post aspirado	38
Figura 34. Hidrogramas de escorrentía de los Ensayos 1 y 2 post aspirado	39
Figura 35. Resumen gráfico de la permeabilidad promedio	41
Figura 36. Comparación de medidas con Hach Sigma 950 en el Punto 1 en el Ensayo 1	42
Figura 37. Resultados del Sensor de Burbujas en el Ensayo 1	42
Figura 38. Resultados del Sensor de Burbujas en el Ensayo 2	43
Figura 39. Situación del Ensayo 1 al final del proceso. a) Junta. b) Geotextil. c) Superficie	43
Figura 40. Situación del Ensayo 2 al final del proceso. a) Junta. b) Geotextil. c) Superficie	44
Figura 41. Balance porcentual de masas de los Ensayos 1 y 2.....	45



Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación entre Sistemas convencionales y SUDS (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007)	4
Tabla 2. SUDS no estructurales (adaptado de Temprano et al., 2008 y de Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007)	5
Tabla 3. SUDS estructurales (adaptado de Temprano et al., 2008 y de Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2007)	6
Tabla 4. Resumen de resultados de investigación	13
Tabla 5. Coordenadas de los puntos de ensayo del permeámetro	22
Tabla 6. Plan de ensayos de la Fase 2	25
Tabla 7. Plan de ensayos de la Fase 3	28
Tabla 8. Volumen generado y reducciones entre Sup. impermeable y Ensayo 1	34
Tabla 9. Resultados de permeabilidad del Ensayo 1	39
Tabla 10. Resultados de permeabilidad del Ensayo 2	40
Tabla 11. Resumen de la permeabilidad promedio y de la desviación estándar	41
Tabla 12. Balance de masas realizado en los diferentes ensayos	44



Anejo

Código de Arduino para la transformación de la señal del sensor de ultrasonidos

```
// SENSOR NIVEL SR04 - Media 10 valores - cada segundo

// Bibliotecas Logger

#include <SdFat.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>

// Define Trig and Echo pin:
const int EchoPin = 3;
const int TriggerPin = 4;

long j;

// Defino variables de almacenamiento en SD
SdFat SD; //SD will be the
SdFat object

#define MOSIpin 11
#define MISOpin 12

RTC_DS1307 RTC; //RTC will be the
RTC_DS1307 object

#define DS1307_I2C_ADDRESS 0x68

char TmeStrng[] = "0000/00/00,00:00:00"; //string template
for RTC time stamp

void setup() {
    // Define inputs and outputs para el sensor
```



```
pinMode(TriggerPin, OUTPUT);
pinMode(EchoPin, INPUT);
// Begin Serial communication at a baudrate of 9600
Serial.begin(9600);

Wire.begin(); // start the i2c
interface
RTC.begin(); // start the RTC

// Set the RTC to the computer time when the sketch is loaded.
// Must comment out for subsequent boots:
// RTC.adjust(DateTime((__DATE__), (__TIME__)));

Serial.print("Find SD: ");
if (!SD.begin(10)) { // initialize the SD card
  Serial.println("SD failed");
  return;
}
Serial.println(" SD OK");

File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) { // if the file is
  available, write a header to it:
  dataFile.print("MEDUSA 7 - Nivel con SR04-T");
  dataFile.close();
}
else {
  Serial.println("file err"); // if the file isn't open,
  pop up an error:
}

}

void loop() {
```



```
// DISTANCIA - MEDIA 4 VALORES
j = 0;
for(int i=0;i<10;i++){
    int dt = ping(TriggerPin, EchoPin);
    j+=dt;
delay(100); }

// DISTANCIA - MEDIA DURACION Y DISTANCIA

float duration = j/10; // Duración promedio
float distance = duration; // Calibración distancia -
rehaacer - Introducir corrección temperatura

// FIJO EL TIEMPO

DateTime now = RTC.now(); // read the time from
the RTC, then construct two data strings:
sprintf(TmeStrng, "%04d/%02d/%02d,%02d:%02d:%02d",
now.year(), now.month(), now.day(), now.hour(), now.minute(),
now.second()); // [added seconds]

// Saco datos por el Serial Monitor (Ctrl+Shift+M):
Serial.print(TmeStrng);
Serial.print(", ");
Serial.print("Pulso(ms) ");
Serial.print(", ");
Serial.println(duration,1);

// Guardo en SD
// write the data to the SD card:
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
// if the file is available, write to it:
```



```
dataFile.print(TmeStrng);dataFile.print(",");
dataFile.print(duration,1);dataFile.print(",");
dataFile.println(distance,1);

dataFile.flush();
// wait for serial data to complete transmission
dataFile.close();

delay(100);
}

int ping(int TriggerPin, int EchoPin) {
    long duration;

    digitalWrite(TriggerPin, LOW); //para generar un pulso
    limpio ponemos a LOW 4us
    delayMicroseconds(4);
    digitalWrite(TriggerPin, HIGH); //generamos Trigger
    disparo) de 10us
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TriggerPin, LOW);

    duration = pulseIn(EchoPin, HIGH); //medimos el tiempo entre
    pulsos, en microsegundos

    return duration;
}
```

