LIFE my building is green

LIFE17 CCA/ES/000088

Application of Nature-Based Solutions for local adaptation of educational and social buildings to Climate Change

Acción: C2

Deliverable: Technical manual for the installation of permeable surfaces, as an NBS prototype

Entregable: Manual Técnico para la instalación de prototipo de suelo permeable

Fecha: 31/07/20

	**LIFE my building is green – LIFE17 CCA/ES/000088** **Entregable:** Manual Técnico para la instalación de prototipo de suelo permeable Fecha: 31/07/2021

Data Project

Project location:	Spain
Project start date:	01/09/2018
Project end date:	31/08/2022
Total budget:	2.854.102 €
EU contribution:	1.697.369 €
(%) of eligible costs:	59.99 %

Data Beneficiary

Name Beneficiary:	AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)
Contact person:	Miguel Vega
Postal address:	C/Claudio Moyano, 1. 28014. Madrid
Telephone:	+34 91 420 30 17
E-mail:	miguel.vega@rjb.csic.es
Project Website:	http://www.life-mybuildingisgreen.eu

Data Deliverable Responsible

Name Beneficiary:	AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)
Contact person:	Marta Castellote, Ángel Castillo, Rafael Piñeiro

E-mail:	martaca@ietcc.csic.es, rpineiro@ietcc.csic.es	acastillo@ietcc.csic.es,

Índice

1. SUMMARY IN ENGLISH 5

2. RESUMEN 5

3. OBJETIVO DEL PROTOTIPO DE SUELO PERMEABLE 6

4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO 9

5. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS 9

5.1 DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES 9
5.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS BALDOSAS 12

6. ENSAYOS REALIZADOS EN EL MATERIAL CURADO Y ENDURECIDO 13

6.1 DRENABILIDAD 13
6.2 ABSORCIÓN TOTAL DE AGUA 15
6.3 PROPIEDADES MECÁNICAS 15
6.4 CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y ASPECTO VISUAL 22

7. MANUAL TÉCNICO DE INSTALACIÓN DE LAS PROBETAS 25

7.1 DISPOSICIÓN DE LAS PROBETAS 25
7.2 PLATAFORMA DEMOSTRATIVA DE LAS PROBETAS 26
7.3 MANUAL DE INSTALACIÓN EN OBRA DEL PROTOTIPO 28

8. INCORPORACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD FOTOCATALÍTICA 30

9. CONCLUSIONES 35

1. SUMMARY IN ENGLISH

This document collects the premises established for the design of a prototype of draining pavement, the description of the materials used and its manufacturing process, at prototype level.

In addition, its mechanical and functional properties have been verified, in accordance with the test regulations applicable to this type of elements for the execution of pedestrian pavements, so that it has been verified that it meets the necessary requirements for its commercialisation and installation.

Finally, the manual for the installation of the draining pavement is presented, with the possible geometric configurations, the technical instructions for its installation and an example of a demonstration platform executed in the facilities of the Eduardo Torroja Institute of Construction Sciences with photocatalytic functionality.

2. RESUMEN

Este documento recoge las premisas establecidas para el diseño de un prototipo de pavimento drenante, la descripción de los materiales empleados y de su proceso de fabricación, a nivel prototipo.

Además, se ha verificado sus propiedades mecánicas y funcionales, de acuerdo con la normativa de ensayo aplicable a este tipo de elementos para la ejecución de pavimentos peatonales, de manera que se ha verificado que cumple los requisitos necesarios para su comercialización y puesta en obra.

Por último se presenta el manual para la instalación del pavimento drenante, con las posibles configuraciones geométricas, las instrucciones técnicas para su puesta en obra y se presenta un ejemplo de plataforma demostrativa ejecutada en las instalaciones del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja con funcionalidad fotocatalítica.

3. OBJETIVO DEL PROTOTIPO DE SUELO PERMEABLE

Durante las visitas previas al inicio del proyecto se detectó un problema en el perímetro del C.P. Gabriela Mistral. Se observó que junto a la fachada del edificio se acumulaba agua de la escorrentía superficial del terreno del patio. Esta zona de acumulación de agua generaba un área embarrada, con el trastorno y los inconvenientes que esta circunstancia genera en un área de recreo infantil.

Se planteó la posibilidad de solucionar este problema, mediante la pavimentación de la zona perimetral del edificio, empleando un sistema de pavimento drenante que evacuara el exceso de agua aportado por la escorrentía superficial, pero que a la vez permitiera reutilizar este caudal de agua para su aprovechamiento.

Este planteamiento se extendió a los otros dos colegios participantes en el proyecto, pues el clima de sus ubicaciones es más lluvioso aún que el del colegio de Badajoz y, lógicamente, presentarían situaciones similares de acumulación de agua y barro en época de lluvia.

Identificado el problema que se quería solucionar, se fijó el objetivo de la propuesta que debía dar respuesta a los siguientes condicionantes:

- Pavimento de tránsito peatonal
- Pavimento permeable, para drenaje de la escorrentía superficial y aprovechamiento de dicho caudal de agua.
- Incorporación de vegetación en el pavimento, generando un pavimento verde, para minimizar su impacto visual en el entorno.
- Reducir la contribución del pavimento al efecto “isla de calor”, al incorporar vegetación al pavimento lo que favorece la retención de humedad.
- Potenciar la contribución del pavimento a la mejora de la calidad ambiental. Además de por la vegetación al propio pavimento, se diseñarán baldosas con actividad fotocatalítica.

La combinación de pavimentos de baldosas y vegetación rastrera o de pradera se ha utilizado tradicionalmente para facilitar el tránsito peatonal por zonas ajardinadas y aprovechando su efecto estético, minimizando el impacto visual del pavimento (Figura 1). Pero este tipo de soluciones sólo da respuesta a esta necesidad de favorecer el tránsito peatonal.




Figura 1: Ejemplos de pavimentos verdes.





Figura 2: Ejemplos de pavimentos verdes comerciales.

Además, existen en el mercado diversas soluciones comerciales para la ejecución de pavimentos verdes (Figura 2). Este tipo de soluciones industrializadas pueden combinarse con sustratos permeables que drenen el agua de las precipitaciones. El caudal drenado puede ser canalizado subterráneamente hasta depósitos para su acopio y posterior reutilización. El resultado de esta combinación son los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (S.U.D.S).





Figura 3: Propuesta de SUDS del Proyecto LIFE CERSUDS (LIFE15/CCA/ES/000091)

Las ventajas de los sistemas SUDS pueden resumirse en:

- Reducir las zonas de pavimento inundadas, especialmente en situaciones de tormenta, aumentando la superficie permeable del pavimento.
- Permite el filtrado de los caudales de escorrentía, reteniendo restos vegetales o áridos arrastrados, mejorando la calidad del agua.
- Permitir reutilizar los caudales de lluvia almacenados para su empleo en épocas de sequía.
- Reducir los caudales punta de escorrentía que se aportan al sistema de saneamiento urbano y, por tanto, al sistema de depuración. Así como la reducción de materiales sólidos, dado que han sido retenidos en origen por el filtrado.

La propuesta del prototipo del presente proyecto podría ser empleada en pavimentos de SUDS, combinado con sistemas de canalización y depósitos de almacenamiento. Pero también permite su empleo en soluciones más tradicionales, para dar una solución estética y transitable en zonas ajardinadas, aportando el propio prototipo la capacidad de drenaje, canalización y almacenamiento en si mismo.

La propuesta se centra en el diseño de una baldosa para tránsito peatonal, permeable, con recogida y evacuación interior del agua de escorrentía superficial, que incorpora vegetación rastrera y con características descontaminantes gracias a su actividad fotocatalítica.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Las baldosas están formadas por tres materiales: una capa de hormigón poroso, con actividad fotocatalítica, permeable al agua que impide la formación en su superficie de charcos a consecuencia de la lluvia; una base resistente de mortero y una capa de tierra vegetal en la que las plantas podrán desarrollarse. La capa de mortero forma una ligera pendiente (~2°) que conduce el agua de lluvia hasta la capa de tierra fértil; así, toda el agua captada por el área total de pavimento acaba estando disponible para los vegetales.

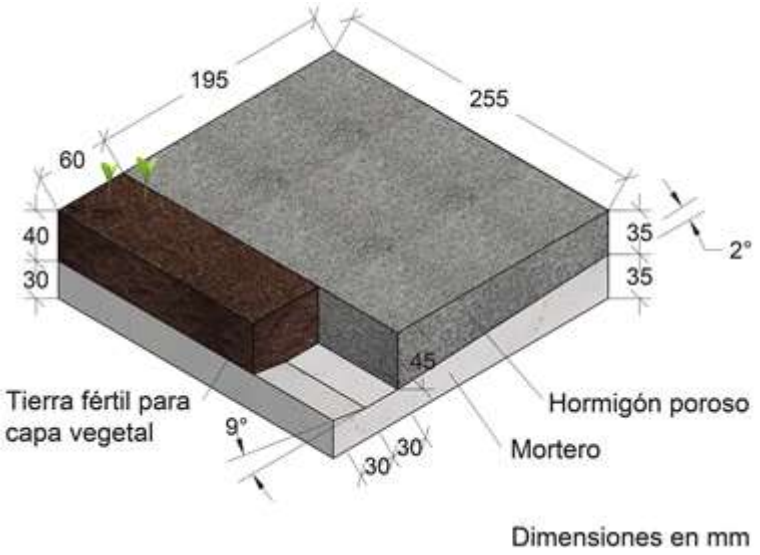


Figura 4: Esquema de la baldosa.

5. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

5.1 Dosificación de los materiales

5.1.1 Hormigón soporte compacto

Para la base de mortero se utilizó un material predosificado de la marca Propamsa denominado M7,5. Este material ha sido el mismo en todas las piezas, combinándolo con cada uno de los hormigones porosos mostrado en el siguiente subapartado.

5.1.2 Hormigón poroso drenante

Se han estudiado varias dosificaciones de hormigón poroso.

Inicialmente, las baldosas se fabricaron con un hormigón poroso predosificado de la marca Paviland. La cantidad de agua indicada por el fabricante fue la que se añadió a la mezcla durante el amasado.

Posteriormente, buscando reducir el peso de las piezas, el hormigón poroso se fabricó utilizando diferentes tipos de arcillas expandidas de dos tamaños máximos: 2,5 mm, denominada "XS", y 5,0 mm, "S". Este material siempre se ha saturado durante varios días antes de amasar para evitar que absorba agua en el proceso de mezclado y de la pasta de cemento. Las mezclas, además de arcilla expandida, se elaboraron con cemento CEM I 52,5 R, arena normalizada del Instituto Eduardo Torroja y agua. En algunas dosificaciones, se añadió un aditivo plastificante de la marca BASF, el MasterEase 3690.

Por último, para aportar más resistencia a la mezcla, tras los primeros resultados de los ensayos de desgaste, se elaboró otra dosificación en la que se sustituyeron las arcillas expandidas por grava silícea de granulometría 4-8. Esta dosificación no contenía aditivos.

Con esta última mezcla, elegida tras superar los ensayos de evaluación de aptitud para el uso, se volvieron a fabricar varias series de probetas para comprobar la capacidad de reproducibilidad de la mezcla a nivel laboratorio, antes de pasar a su fabricación de forma industrializada.

Todas las dosificaciones estudiadas se muestran en la tabla 1 siguiente (los valores se indican en kg). "A. E." se usa como abreviación de "arcilla expandida":

Materiales	A.E. S	A.E. S + A.E. XS	A.E. S + A.E. XS (sin aditivo)	Grava 4-8
CEM I 52,5 R Tudela Veguín	10,0	10,0	10,0	10,0
Arena normalizada IETcc - CSIC	10,0	10,0	10,0	10,0
Agua	3,0	3,0	2,4	5,8
Arcilla expandida S Weber (saturada)	18,3	15,5	15,4	-

Arcilla expandida XS Weber (saturada)	-	6,6	6,6	-
Fluidificante MasterEase 3690 BASF	0,026	0,026	-	-
Grava silícea 4-8	-	-	-	128,8
Relación a/c	0,30	0,30	0,24	0,58
% aditivo	0,26%	0,26%	-	-

Tabla 1: Dosificaciones estudiadas

5.1.3. Fotocatalizador

El fotocatalizador utilizado ha sido un fotocatalizador comercial de base TiO_2, en emulsión acuosa, cuyo proveedor no se facilita por razones de confidencialidad.

5.1.4 Capa vegetal

Para la capa vegetal se ha buscado una solución que facilite la manipulación, transporte e instalación. Para ello se han sellado, mediante calor, bolsas de plástico compostable en las que se había introducido previamente sustrato comercial vegetal "universal". Las semillas pueden ser introducidas mezcladas con el sustrato antes de sellar la bolsa o pueden ser sembradas posteriormente haciendo unos pequeños agujeros en ella. Una vez que el sustrato se asiente mediante el paso del tiempo y, sobre todo, por las raíces de las plantas, la bolsa de plástico ya no será necesaria para contener la tierra y se auto-compostará sirviendo como nutrientes a los vegetales.



Figura 5: Bolsa de plástico compostable rellena con sustrato vegetal.

5.2 Proceso de fabricación de las baldosas

Todas las baldosas se han fabricado en el IETcc-CSIC siguiendo el proceso descrito en este punto. Quizás, algunos de los puntos siguientes pueden sufrir ligeros cambios si este proceso se realiza en un futuro de manera industrial.

1. Los moldes se llenan con hormigón poroso. La cara superior del mismo está situada mirando hacia arriba, con la misma orientación que quedará la pieza cuando esté acabada. Se vierte el hormigón poroso en el molde (Fase 1ª). Una vez enrasados (Fase 1b), los moldes se introducen en cámara húmeda durante 24 horas (23°C ± 3°C de temperatura y humedad relativa ≥ 95%).

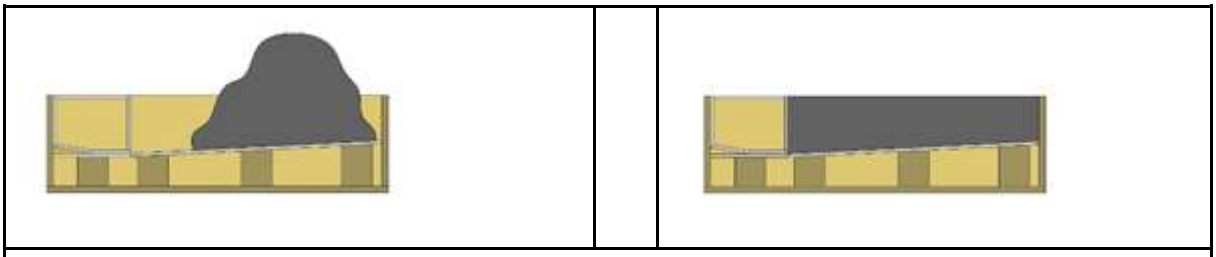


Figura 6: Proceso de fabricación de las baldosas. Fase 1a y 1b.

2. Los moldes con el hormigón poroso curado y endurecido se sacan de la cámara húmeda. Antes de rellenar el molde con el mortero que forma la capa base, se rotan las piezas de hormigón poroso horizontalmente, de manera que queden bocabajo.

3. Cada molde se rellena con mortero y, tras enrasarlo, se vuelve a introducir todo el conjunto en la cámara húmeda.

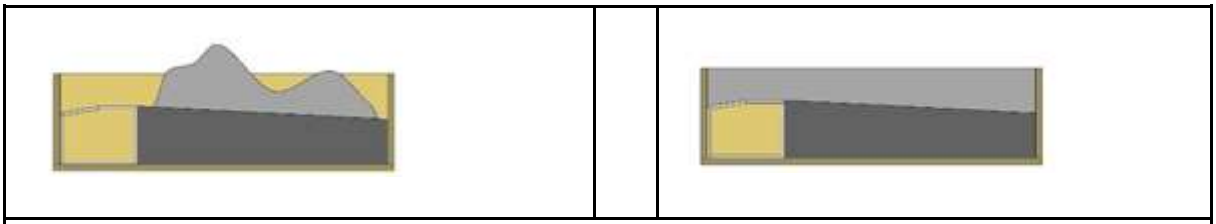


Figura 7: Proceso de fabricación de las baldosas. Fase 2 y 3.

4. Tras 24 horas, los moldes se sacan de la cámara húmeda y, una vez desmoldadas las piezas, se puede considerar concluida la fabricación de las mismas.



Figura 8: Proceso de fabricación de las baldosas. Fase 4.

6. ENSAYOS REALIZADOS EN EL MATERIAL CURADO Y ENDURECIDO

Cuanto mayor es el valor de conductividad hidráulica relativa, mejor es el drenaje de la pieza. La mezcla elaborada con grava presenta el mejor valor de drenabilidad sin alcanzar los valores del hormigón predosificado. Sin embargo, como puede verse en la tabla de propiedades mecánicas, la anchura y la longitud de la huella del hormigón predosificado no son suficientes para cumplir con los valores mínimos de las normas UNE 127748-1:2012 y UNE-EN 13748-2:2005; sólo la última dosificación alcanza valores aceptables en los ensayos mecánicos. Debido a esto, la mezcla elegida para elaborar las probetas definitivas ha sido la elaborada con la última dosificación, la que contiene grava silícea.

A continuación, se detallan los resultados de los ensayos comentados en el párrafo anterior.

6.1 Drenabilidad

Estos ensayos se han realizado siguiendo las normas "UNE-EN 12697-40:2013: Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 40: Drenabilidad in situ." y "UNE-EN 1936:2007: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.".

Se han obtenido la conductividad hidráulica relativa, la densidad aparente y la porosidad abierta de los hormigones porosos. La conductividad hidráulica relativa representa el tiempo necesario para desaguar el agua de la superficie del material. La densidad aparente da una idea de la ligereza de la probeta. La porosidad abierta refleja la cantidad de poros que están conectados en la masa de la pieza, pero no considera los poros aislados del interior del material, como, por ejemplo, los que están en el interior de cada esfera de arcilla expandida.

Todos estos resultados aparecen en la tabla siguiente:

Nombre de la mezcla	Conductividad hidráulica relativa (HC) [1/s]	Densidad aparente [kg/m^3]	Porosidad abierta [%]
Paviland (predosificado)	0,142	2446	12,1
Iniciales	0,023	-	-
A.E. S	0,030	-	-
A.E. S + A.E. XS	0,005	1105	20,8
A.E. S + A.E. XS (sin aditivo)	0,009	1096	22,6
Grava 4-8	0,042	2362	9,8

Tabla 2: Resultados de los ensayos relativos a la drenabilidad.



Figura 9: Ensayo de drenabilidad.

6.2 Absorción total de agua

En este apartado se presentan los resultados de absorción de agua de las probetas de la mezcla elegida.

Probeta	Absorción por capilaridad 24 horas [g/cm^2]	Absorción de agua total [%]
1	0,5	4,5
2	0,4	4,4
3	0,3	4,5
4	0,4	5,4
Media	0,4	4,7

Tabla 3. Absorción de agua de las probetas de la mezcla elegida.

Según la Norma UNE 127748-2:2006, las baldosas presentarán resistencia climática suficiente si se cumple que la media de la absorción de agua por la cara vista no es mayor de 0,4 g/cm^2 en la muestra compuesta por 3 probetas. En este caso, los resultados satisfacen este requisito.

Además, para asegurar la durabilidad del elemento para el uso habitual para el que se comercializa, las baldosas deben cumplir con el requisito de la clase 2 y marcado B. Éste indica que la absorción media en tanto por ciento de agua en masa tiene que ser menor o igual a 6 %. También lo cumplen las baldosas ensayadas.

6.3 Propiedades mecánicas

Los ensayos de este apartado se han realizado para estudiar las características del hormigón poroso, especialmente, la resistencia a la abrasión. Estos ensayos se rigen por las normas "UNE 127748-1:2012: Baldosas de terrazo. Parte 1: Baldosas de terrazo para uso interior.

Complemento nacional a la Norma UNE-EN 13748-1" y "UNE-EN 13748-2:2005: Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior".

Los resultados aparecen en la tabla inferior:

Nombre de la mezcla	Longitud de la huella [mm]	Anchura de la huella [mm]	Máximo valor de anchura de la huella obtenido entre todas las probetas del mismo tipo [mm]
Paviland (predosificado)	70,5	30,0	31,0
Iniciales	70,0	34,0	34,0
A.E. S	69,0	35,0	36,0
A.E. S + A.E. XS	70,0	31,0	31,0
A.E. S + A.E. XS (sin aditivo)	64,5	26,5	28,0
Grava 4-8	64,0	23,0	24,5

Tabla 4: Resultados de los ensayos relativos a las propiedades mecánicas con las primeras dosificaciones.

Existen dos tablas en las normas citadas en el primer párrafo de este apartado que indican la categoría a la que pertenece la baldosa de acuerdo a los resultados anteriores. Es necesario que ninguna probeta del grupo supere el valor requerido, por lo que deben considerarse valores máximos en lugar de medios.

RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN SEGÚN USO PREVISTO	
USO PREVISTO	DESGASTE POR ABRASIÓN (VALOR INDIVIDUAL)
Uso normal	≤ 25 mm
Uso intensivo	≤ 23 mm
Uso industrial	≤ 21 mm

Tabla 5: Requisitos según UNE 127748-1:2012.

REESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN SEGÚN USO PREVISTO		
CLASE	MARCADO	DESGASTE POR ABRASIÓN (VALOR INDIVIDUAL)
1	F	CARACTERISTICA NO MEDIDA
2	G	≤ 26 mm
3	H	≤ 23mm
4	I	≤ 20 mm

Tabla 6: Requisitos según UNE-EN 13748-2:2005.

De esta manera, la última dosificación de hormigón poroso estudiada, la elaborada con grava silícea de granulometría 4-8, pertenece a la categoría "uso normal", clase "2" y marcado "G".

Una vez elegida la mezcla más satisfactoria y antes de su fabricación de manera industrial, se han elaborado probetas en laboratorio para estudiar la uniformidad que se puede alcanzar repitiendo amasadas en las cuales conforman como máximo 20 probetas.

Con estas piezas, se han determinado la resistencia al deslizamiento USRV con péndulo de fricción y la resistencia a flexión de las probetas de la mezcla elegida. Todas las baldosas ensayadas han alcanzado un valor mínimo de 2,9 N/m^2; el valor medio es de 3,5 N/m^2 y el máximo de 3,7 N/m^2.

Probeta	Espesor [cm]	Carga de rotura [kN]	Resistencia a flexión [kN]
1	6,60	16,4	3,7
2	6,80	17,4	3,7
3	6,80	17,1	3,7
4	6,80	13,2	2,9

Tabla 7: Resultados de resistencia a flexión de las probetas de la mezcla elegida.

Según la Norma UNE 127748-1:2012, para estas probetas, cuyo tamaño no alcanza los 1100 cm^2, las baldosas cumplen con la resistencia necesaria para soportar un uso normal.

CARGA DE ROTURA SEGÚN USO PREVISTO Y TAMAÑO DE LA BALDOSA.		
USO PREVISTO	TAMAÑO DE LA BALDOSA (cm^2)	CARGA DE ROTURA (VALOR INDIVIDUAL) (kN)
Uso normal	≤ 1100 >1100	≥2,5 ≥3,0
Uso intensivo	≤ 1100 >1100	≥3,0 ≥3,9
Uso industrial	≤ 1100 >1100	≥3,6 ≥4,7

Tabla 8: Requisitos según UNE 127748-1:2012.

Según la Norma UNE-EN 13748-2:2005, las baldosas poseen la clase 1 ST.

CLASES POR RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA SU USO EXTERIOR			
CLASE	MARCADO	RESISTENCIA MEDIA A FLEXIÓN (MPa)	RESISTENCIA INDIVIDUAL
1	ST	3,5	2,8
2	TT	4,0	3,2
3	UT	5,0	4,0

Tabla 9: Requisitos según UNE-EN 13748-2:2005.

La tabla siguiente, también de la Norma UNE-EN 13748-2:2005, indica que la baldosa pertenece a la clase 30 y al marcado 3T. Esto se obtiene considerando que la carga de rotura media de cuatro probetas debe ser mayor o igual que los valores establecidos en la tabla según su clase de flexión correspondiente y que ningún valor individual de carga de rotura debe ser inferior a los valores establecidos en la tabla según su clase de flexión correspondiente.

CLASES POR CARGA DE ROTURA			
CLASE	MARCADO	CARGA MEDIA DE ROTURA (kN)	CARGA INDIVIDUAL DE ROTURA (kN)
30	3 T	3,0	2,4
45	4 T	4,5	3,6
70	7 T	7,0	5,6
110	11 T	11,0	8,8
140	14 T	14,0	11,2
250	25 T	25,0	20,2
300	30 T	30,0	24,0
Nota: Por consideraciones de diseño, se deberá prestar una atención especial a las posibles condiciones de carga en el caso de baldosas de longitud superior a 600 mm y si se requiere clase 30, sólo están recomendadas para su uso sobre base rígida continua.			

Tabla 10: Requisitos según UNE-EN 13748-2:2005



Figura 10: Una de las probetas definitivas tras romper a flexión.

En cuanto a los ensayos de resistencia al deslizamiento, para cada baldosa ensayada se escogió una superficie de su cara vista. Esta área ha sido ensayada utilizando el patín deslizador de 76,2 mm de anchura, un largo de 25,4 mm, y un espesor de goma de 6,4 mm. La longitud ensayada fue de 126 mm, y la lectura se realizó en la escala C del aparato.

Los resultados se presentan en la tabla siguiente:

	Valor medio del ensayo [USRV]	
Probeta	0º	180º
1	57,0	57,0
2	57,0	57,0
3	57,0	57,0
4	58,0	57,0
5	57,0	57,0

Tabla 11: Resultados del ensayo de resistencia al deslizamiento.

Según el Código Técnico de la Edificación, en la sección SU 1, Seguridad frente al riesgo de caídas, el valor de resistencia al deslizamiento obtenido establece que la baldosa tiene una clase 3.

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN SU RESBALADICIDAD	
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO R_d	CLASE
$R_d \leq 15$	0
$15 < R_d \leq 35$	1
$35 < R_d \leq 45$	2
$R_d > 45$	3

Tabla 12: Clasificación de los suelos según el CTE.



Figura 11: Baldosa sometida al ensayo de resistencia al deslizamiento.

En la tabla siguiente, aparecen las posibles localizaciones en las que se puede colocar la baldosa según el CTE. Estas baldosas se podrían utilizar en cualquiera de las zonas que aparecen en la tabla.

SEGURIDAD DE UTILIZACIÓN Y ACCESIBILIDAD RESBALADICIDAD DE LOS SUELOS (Rd según UNE-ENV 12633:2003)		DB-SUA 1
LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO. SUA 1-1.		CLASE
ZONAS INTERIORES SECAS	Pte. < 6 % Pte. ≥ 6 % Escaleras	1 2 2
ZONAS INTERIORES HÚMEDAS, TALES COMO LAS ENTRADAS A LOS EDIFICIOS DESDE EL ESPACIO EXTERIOR (EXCEPTO CUANDO SE TRATE DE ACCESOS DIRECTOS A ZONAS DE USO RESTRINGIDO), TERRAZAS CUBIERTAS, VESTUARIOS, BAÑOS, ASEOS, COCINAS, ETC)	Pte. < 6 % Pte. ≥ 6 % Escaleras	2 3 3
ZONAS EXTERIORES		3
PISCINAS	ZONAS PREVISTAS PARA USUARIOS DESCALZOS. FONDO DE VASOS DE PROFUNDIDAD ≤ 1.50 m.	3 3
DUCHAS		3

Tabla 13: Clase exigible a los suelos en función de su localización según CTE.

Por otro lado, el factor "k" del hormigón poroso elegido es igual a 0,83. Este número representa la relación entre la masa real de árido contenida en el hormigón poroso en un volumen V y la masa de árido compactado en el mismo volumen V.



Figura 12: Aspecto final de la superficie del hormigón poroso elegido.

6.4 Características dimensionales y aspecto visual

No se aprecia diferencia de color o tonalidad entre las piezas que componen la muestra, ni defectos superficiales apreciables a simple vista.

En las tablas siguientes aparecen las características dimensionales de las piezas:

	Lados						Espesor [mm]		
	Largo [mm]			Ancho [mm]					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	253,5	253,5	253,4	254,5	254,5	254,5	65,8	64,9	69,6
2	256,5	256,5	256,5	252,5	252,5	252,5	65,5	64,8	68,5
3	255,5	255,0	255,5	257,0	257,0	257,0	65,3	67,4	66,7
4	256,5	256,5	256,5	254,5	254,5	254,5	68,2	68,7	65,5
5	256,5	256,0	256,0	253,0	253,0	253,5	67,0	67,8	65,2
6	255,5	255,5	255,5	255,0	255,5	255,0	65,2	66,5	65,5
7	256,5	256,5	256,5	254,5	254,0	254,0	65,8	65,2	65,6
8	257,5	257,5	257,5	250,0	255,0	250,0	67,1	69,0	67,9
Media		255,9			254,2			66,6	

Tabla 14. Lados y espesores de las probetas de la mezcla elegida.

	Bordes (flecha) [mm]		Planeidad (flecha) [mm]	
	A	B	A	B
1	0,1	0,1	1,5	0,5
2	0,1	0,1	2,0	1,2
3	0,1	0,1	0,3	1,0
4	0,1	0,1	1,2	1,0
5	0,1	0,1	1,9	0,7
6	0,1	0,1	1,3	0,8
7	0,1	-	0,6	1,0
8	0,1	0,1	0,9	1,2
Media	0,1		1,1	

Tabla 15. Bordes y planeidad de las probetas de la mezcla elegida

	Espesor capa de huella mínimo [mm]			
	1	2	3	4
Media	31,5	30,5	32,0	31,0

Tabla 16. Espesor de la capa de huella mínimo de las probetas de la mezcla elegida.

Según la Norma UNE-EN 13748-1:2005, las baldosas deben cumplir con la tabla siguiente:

DIMENSIÓN	TOLERANCIA SOBRE EL VALOR MEDIO
LONGITUD DE LADO	± 0,3 %
ESPESOR	± 2 mm (para un espesor < 40 mm) ± 3 mm (para un espesor ≥ 40 mm)
La diferencia entre dos medidas cualesquiera del espesor de una baldosa individual debe ser ≤ 3 mm. Las baldosas especificadas como calibradas tendrán una tolerancia sobre el espesor de ± 1 mm	

Tabla 17. Requerimientos según Norma UNE-EN 13748-1:2005.

Aunque no se cumple estrictamente lo que aparece en la norma, debido a su fabricación "artesanal", se prevé que sí cumplen cuando se fabriquen de manera industrial

7. MANUAL TÉCNICO DE INSTALACIÓN DE LAS PROBETAS

7.1 Disposición de las probetas

Las características geométricas de las baldosas permiten crear combinaciones que aportan diversidad formal, para evitar la monotonía estética. En la siguiente imagen, se muestran nueve configuraciones diferentes a modo de ejemplo.

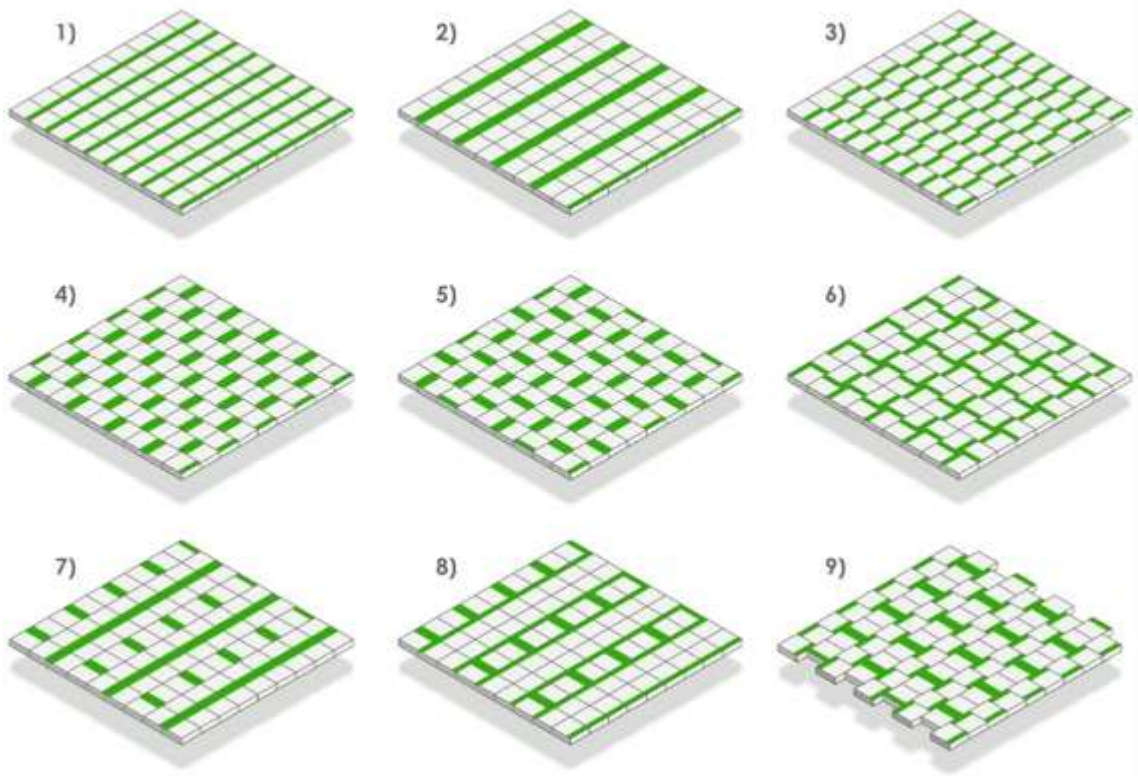


Figura 13: Diferentes configuraciones gracias a las características geométricas de las piezas.

7.2 Plataforma demostrativa de las probetas

Un área de 4 m^2 formada por 64 piezas ha sido instalada en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Se han utilizado dos disposiciones diferentes basadas en las número 1 y 2 de la imagen anterior. Además, esta instalación dispone de un sistema de pendientes, tuberías y arquetas que permite recoger el agua de lixiviado para ser analizada.



Figura 14: Baldosas colocadas en las instalaciones del IETcc-CSIC.



Figura 15: Baldosas colocadas en las instalaciones del IETcc-CSIC.



Figura 16: Pavimento con vegetación instalada en la plataforma del IETcc-CSIC.

7.3 Manual de instalación en obra del prototipo

El prototipo de baldosa drenante está ideado para soluciones de pavimento en exteriores, ejecutados sobre firme para tráfico de categoría C4 (áreas peatonales).

La instalación en obra del prototipo puede realizarse de dos formas, dependiendo de si se plantea la recuperación del excedente de escorrentía o sin recuperación de dicho exceso, solución de caracter más estético pero con recuperación parcial del caudal de lluvia recogido, hasta la saturación del sustrato y de la vegetación instalada.

7.3.1 Instalación sin recuperación del exceso de escorrentía.

El sistema de pavimento peatonal drenante vegetal estará compuesto por las siguientes capas:

- Explanada base categoría de explanada E1 (5 <= CBR < 10) (California Bearing Ratio), compuesto por base flexible de zahorra natural, de 20 cm de espesor, con extendido y compactado al 100% del Proctor Modificado. Ejecutada con pendientes según proyecto.

- Ejecución del pavimento para uso peatonal, de baldosa de hormigón drenante para exteriores según prototipo, sobre una capa de arena de granulometría comprendida entre 0,5 y 5 mm, dejando entre ellas una junta de separación de entre 2 y 3 mm, para su posterior rejuntado con arena natural, fina y seca, de 2 mm de tamaño máximo; colocadas a pique de maceta.

- Relleno y siembra del sustrato vegetal en los espacios previstos en las baldosas, mediante relleno con cartuchos preformados de siembra, con mezcla preparada de tierra vegetal, abono para presiembra y semillas de vegetación rastrera preseleccionadas. Apertura de los cartuchos y primer riego.

7.3.2 Instalación con recuperación del exceso de escorrentía.

Para esta solución con recuperación del excedente de escorrentía, el sistema de pavimento peatonal drenante vegetal estará compuesto por las siguientes capas:

- Explanada base categoría de explanada E1 (5 <= CBR < 10) (California Bearing Ratio), compuesto por base flexible de zahorra natural, de 20 cm de espesor, con extendido y compactado al 100% del Proctor Modificado.

- Solera de hormigón no estructural en masa (HM-20/P/20/X0), de 10 cm de espesor, con extendido y vibrado manual con regla vibrante de 3 m, acabado maestreado. Ejecutada con pendientes en el sentido de la evacuación de las aguas, según proyecto, hacia la canalización del sistema de recuperación y almacenamiento.

- Ejecución del pavimento para uso peatonal, de baldosa de hormigón drenante para exteriores según prototipo, colocadas a pique de maceta sobre cama de mortero de cemento M-5 de 3 cm de espesor, dejando entre ellas una junta de separación de entre 1,5 y 3 mm y con relleno de juntas con arena silícea de tamaño 0/2 mm.

- Relleno y siembra del sustrato vegetal en los espacios previstos en las baldosas, mediante relleno con cartuchos preformados de siembra, con mezcla preparada de tierra vegetal, abono para presiembra y semillas de vegetación rastrera preseleccionadas. Apertura de los cartuchos y primer riego.

8. INCORPORACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD FOTOCATALÍTICA

La mitad de la superficie de pavimento verde permeable expuesta en el IETcc se dotó de propiedades fotocatalíticas mediante aplicación de un producto comercial en emulsión el día 20/10/2021.

La mitad no fotocatalítica se cubrió y selló mediante film plástico y el fotocatalizador fue aplicado sobre la plataforma de pavimento permeable, así como sobre testigos del mismo material (parte permeable y parte estructural). Se aplicaron dos pasadas de producto mediante una pistola pulverizadora, asegurando que el producto se fijaba sobre el sustrato (Ver figuras 17-20).



Figura 17: Aplicación de la emulsión fotocatalítica.



Figura 18: Aplicación de la emulsión fotocatalítica.



Figura 19: Plataforma con emulsión fotocatalítica aplicada en una mitad.



Figura 20: Testigos con emulsión fotocatalítica aplicada

Transcurridos 7 días desde la aplicación del fotocatalizador, semana durante la cual no se registraron lluvias en Madrid, se llevó a cabo la determinación de la eficiencia para degradación de NOx ambiental según norma ISO 22197-1 “Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics)-Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials- Part 1: Removal of nitric oxide”, modificada para un menor tiempo de ensayo para los testigos ubicados junto a la plataforma.

El principio de este método consiste en la medida de la capacidad de eliminación de contaminantes del aire por materiales fotocatalíticos, exponiendo una probeta de ensayo a una corriente de aire contaminado con óxido nítrico (NO), en condiciones de iluminación por luz ultravioleta. La probeta de ensayo, situada en un fotoreactor de flujo continuo, se activa mediante la luz ultravioleta, absorbiendo y oxidando NO para formar ácido nítrico o nitrato sobre su superficie. Parte del NO se oxida a NO2, por lo que el rendimiento del proceso se determina mediante la medida de la cantidad neta de óxidos de nitrógeno eliminados, NOx, donde: NOx = NO eliminado- NO2 formado.

La variación en las concentraciones de NO y NO_2 para las probetas a lo largo de los ensayos se representa en la figura 21.

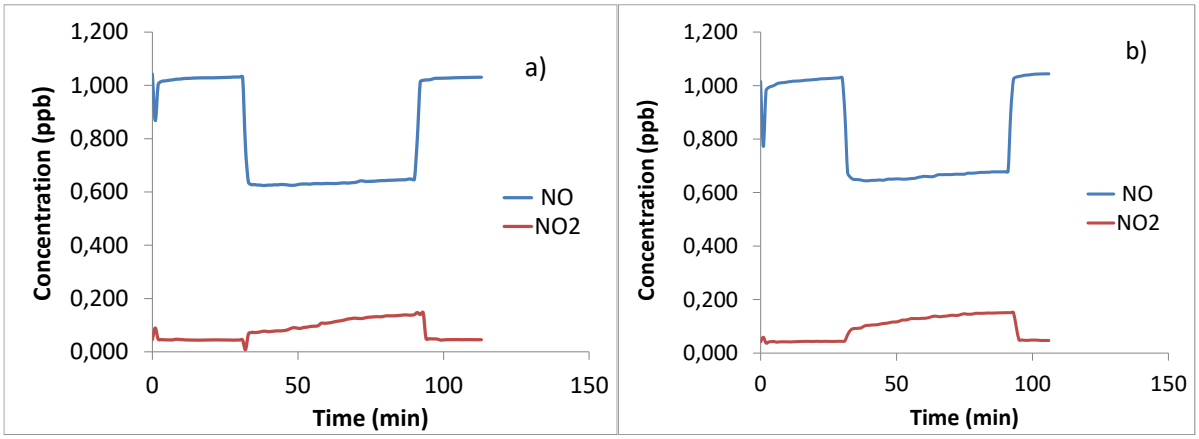


Figura 21: Variación en las concentraciones de NO y NO_2 a lo largo de los ensayos a) parte estructural del pavimento, b) parte permeable del pavimento

Los resultados del ensayo según cálculos recogidos en la ISO 22197-1, se presentan en la tabla 18. El resultado final del ensayo, según el protocolo de esta norma es la cantidad neta NOx eliminada (µmol), considerando como valor inicial el NO suministrado. Este valor, junto con los valores intermedios de los que se compone este último se presenta en la tabla 4 (valores sombreados en color azul). Cabe destacar que estos valores corresponden a un tiempo de irradiación de 60 min, menor que el del ensayo en condiciones estándar. Adicionalmente, se han calculado los porcentajes de NOx eliminado en base a las concentraciones de suministro y justo antes encender la fuente de radiación, considerando sólo el tiempo de iluminación y normalizando por el área y flujo radiante nominal. Para éste último caso, se ha determinado además el % de NO eliminado, siendo éstos los resultados que se obtienen en base al protocolo de cálculo de la norma UNE

127197-1:2013 de rendimientos en purificación de aire, para NO y NOx (valores sombreados en color rosa).

Probeta	**Parte estructural**	**Parte permeable**
Concentración NO suministrado	1015	1042
Tiempo de estabilización (min)	30	30
Cantidad NOx adsorbido (µL/L)	0,02	0,09
Concentración NO después periodo adsorción (justo antes de iluminación)	1028	1031
Fracción en volumen respecto a la suministrada (%)	100	99
Tiempo de iluminación (min)	60	60
Cantidad NO eliminado – nNO (µmol)	2,79	3,19
Cantidad NO_2 formado- nNO_2 (µmol)*	0,67	0,47
% NOx eliminado: considerando NO suministrado	**24,27**	**30,13**
% NOx eliminado: considerando NOx justo antes de iluminación= NO (%)-UNE 127197-1:2013	**25,38**	**29,33**
% NO eliminado: considerando NO justo antes de iluminación= NOx (%)-UNE 127197-1:2013	**34,10**	**36,24**
*considerando el NO_2 suministrado		

Tabla 18: Resultados obtenidos para las probetas ensayadas según norma ISO 22197-1 y según norma UNE 127197-1:2013

9. CONCLUSIONES

- Se ha logrado diseñar y fabricar un prototipo de suelo verde, permeable y fotocatalítico como solución SBN que ha sido instalado en el IETcc.

- Se ha verificado que cumple los requisitos necesarios, según normativa vigente para este tipo de pavimentos peatonales, para su comercialización y puesta en obra.

- Se le ha dotado de funcionalidad fotocatalítica, tal y como estaba previsto en el plan de trabajo del proyecto

- Se ha presentado el manual para su instalación, con las posibles configuraciones geométricas y las instrucciones técnicas para su puesta en obra, así como un ejemplo de plataforma de demostración ejecutada en las instalaciones del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.