

Desarrollo de una mezcla bituminosa ultraporosa para sistemas SUDS

Pablo Álvarez Troncoso

palvarez@becsa.es

Aida Marzá Beltran

amarza@becsa.es

Nacho Torres de la Rosa

ntorres@simetriagrupo.com

Christopher De La Fuente Navarro

christopher.delafuente@unican.es

Irene Indacoechea Vega

irune.indacoechea@unican.es

En un contexto global donde el cambio climático y las demandas de movilidad evolucionan rápidamente, desarrollar infraestructuras de carreteras que combinen sostenibilidad y resiliencia se ha convertido en un imperativo a corto plazo. Estos desafíos requieren soluciones innovadoras, pavimentos diseñados para soportar y adaptarse a condiciones climáticas extremas garantizando su funcionalidad y durabilidad a lo largo del tiempo. Los pavimentos resilientes, no solo se caracterizan por su resistencia estructural, sino también por su capacidad de recuperación frente a situaciones adversas, como variaciones extremas de temperatura, cargas pesadas y fenómenos naturales de, cada vez, mayor impacto.

Uno de los fenómenos que más preocupa en la vertiente mediterránea de la península ibérica es el de las lluvias de carácter localmente fuerte que golpean los municipios que se encuentran especialmente expuestos debido a la orografía de la zona. En el presente artículo se expone el diseño y desarrollo de una mezcla bituminosa altamente porosa encaminada a paliar los fenómenos de escorrentía que se producen en las ramblas de los citados municipios y que se presenta como alternativa a soluciones comerciales de hormigón poroso actualmente existentes en el mercado. Este tipo de soluciones ayudan a canalizar y transportar las aguas superficiales funcionando como capa superficial en los denominados sistemas SUDS. El principal reto ha consistido en obtener, reutilizando fibras de aramida, una estructura bituminosa con huecos interconectados y mecánicamente competente, con un volumen final de huecos en mezcla cercano al 28%. Con este diseño se persigue alcanzar una elevada capacidad de drenaje superior a 500 litros/min·m² asegurando de forma paralela un mantenimiento de la estructura porosa en el tiempo y una resistencia suficiente a los esfuerzos tangenciales producidos por el tráfico en zonas urbanas, principales hándicaps frente a las soluciones basadas en hormigón.

Además de mejorar el drenaje, este tipo de pavimentos presentan beneficios ambientales y de confort. Su mayor capacidad para absorber ruido de rodadura convierte a este tipo de mezcla en una opción ideal para entornos urbanos. Desde el punto de vista del impacto ambiental propio, la elevada reciclabilidad de las mezclas bituminosas, que también ha sido objeto de estudio en el proyecto, hace de ésta una solución con potencial suficiente para convertirse en una alternativa a los sistemas actuales.

Palabras Clave: Pavimentos resilientes, Sistemas SUDS, permeabilidad

In a global context where climate change and mobility demands are rapidly evolving, developing road infrastructures that combine sustainability and resilience has become a short-term imperative. These challenges call for innovative solutions—pavements designed to withstand and adapt to extreme climatic conditions while maintaining functionality and durability over time. Resilient pavements are characterized not only by their structural strength but also by their capacity to recover from adverse situations such as extreme temperature variations, heavy loads, and increasingly severe natural phenomena. One of the most concerning phenomena along the Mediterranean side of the Iberian Peninsula is the occurrence of

locally intense rainfall, which frequently affects municipalities particularly exposed due to the region's orography. This article presents the design and development of a highly porous bituminous mixture aimed at mitigating runoff phenomena that occur in the "ramblas" (dry streambeds) of these municipalities. The proposed solution serves as an alternative to existing commercial porous concrete systems currently available on the market. Such solutions help channel and convey surface water, functioning as the top layer within so-called Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). The main challenge has been to obtain, through the reuse of aramid fibers, a bituminous structure with interconnected voids and adequate mechanical performance, achieving a final air void content of approximately 28%. With this design, the goal is to reach a high drainage capacity—greater than 500 liters/min·m²—while ensuring the long-term stability of the porous structure and sufficient resistance to shear stresses caused by urban traffic, which are the main drawbacks of concrete-based solutions. Beyond improving drainage, these pavements also offer environmental and comfort benefits. Their enhanced ability to absorb traffic noise makes this type of mixture an ideal choice for urban environments. From an environmental impact perspective, the high recyclability of bituminous mixtures—also studied within the project—makes this a promising alternative to current systems.

Keywords: Resilient Pavements, Sustainable Urban Drainage Systems, and Permeability

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las consecuencias del cambio climático han hecho evidente la necesidad de adaptar las infraestructuras viales para responder a los desafíos actuales. La creciente frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, como lluvias torrenciales, han puesto de manifiesto la importancia de contar con pavimentos que no solo resistan condiciones adversas, sino que también contribuyan a mitigar problemas como el drenaje ineficiente. En este contexto, los pavimentos resilientes surgen como una solución innovadora que combina sostenibilidad, funcionalidad y adaptabilidad. Estos no solo deben cumplir con los estándares técnicos convencionales, sino también integrar avances que respondan a las nuevas demandas ambientales y sociales.

La importancia de este nuevo enfoque adaptativo se ve claramente representada en publicaciones como la monografía "Metodología de adaptación al cambio climático en carreteras" redactada por el Grupo de Trabajo Transversal sobre Cambio Climático y Resiliencia en Carreteras de la Asociación Técnica de la Carretera, que busca proporcionar una guía metodológica que permita identificar vulnerabilidades en la red viaria, evaluar riesgos derivados de fenómenos climáticos extremos y proponer medidas adaptativas que incrementen la resiliencia de las infraestructuras. Para ello se realiza una evaluación de riesgos climáticos, se propone un análisis de esce-

narios climáticos futuros, considerando variables como temperaturas extremas, lluvias intensas, inundaciones y sequías, escenarios clave para determinar las zonas de mayor vulnerabilidad en la red de carreteras. A continuación, se identifican los impactos, es decir, los diferentes fenómenos climáticos que afectan a componentes clave de las carreteras. Una vez detectados estos impactos, se desarrollan estrategias de adaptación como refuerzos de pavimentos, mejora de sistemas de drenaje y uso de materiales más resilientes, que no solo buscan mitigar los efectos del cambio climático, sino que también fomenten el uso de soluciones innovadoras que reduzcan la huella de carbono y promuevan la economía circular en el ámbito de la construcción y mantenimiento de carreteras.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo consiste en diseñar y desarrollar una mezcla altamente porosa con una capacidad de drenaje similar a las soluciones de hormigón permeable ya existentes, que alcance una capacidad de evacuación de agua de 500 litros/min·m². Esto requiere de la búsqueda de un equilibrio en el diseño entre la existencia de huecos interconectados y una estabilidad estructural y mecánica sostenible en el tiempo. Para ello ha sido necesario recurrir a la inclusión de fibras que realicen, al menos en parte, la labor del mástico bituminoso,

en la búsqueda de conseguir un elevado contenido de huecos en mezcla y tratar en la medida de lo posible, que estos huecos estén interconectados. Para este desarrollo, abordado en el marco del proyecto Tecnocir, se han utilizado fibras de aramida reciclada con las que ya se habían alcanzado resultados satisfactorios en mezclas porosas convencionales y de este modo minimizar el impacto ambiental del empleo de estas.

3. DESARROLLO

3.1 Componentes

Se ha llevado a cabo una caracterización previa de las materias primas de partida: betún y áridos.

Se ha partido de un betún modificado con polímeros al ser necesaria una óptima adhesión entre árido y ligante en ausencia de finos para alcanzar la porosidad necesaria.

Con el objetivo de alcanzar un porcentaje de huecos en mezcla superior a los estándares de mezcla porosa, es necesario sustituir la acción de parte del mástico, que se sacrifica para conseguir mayor porosidad, por la acción

de fibras que ayuden a fijar el ligante, prevenir escurrimientos y optimizar la pérdida de partículas de la mezcla resultante. Las fibras recicladas inicialmente estudiadas fueron las siguientes:

3.1.1 Residuo curado

Este residuo está formado prácticamente en su totalidad por lana de roca (Figura 1). Se trata de un material hidrófilo que presenta una conductividad baja.



Figura 1. Lana de roca

Tabla 1. Propiedades del ligante

Tipo	Propiedades	Resultado	Norma
PMB 45/80-65	Penetración (25°C, dmm)	62	EN 1426
	Punto de reblandecimiento (°C)	71.5	EN 1427
	Recuperación elástica (25°C, %)	80	EN 13398
	Punto de fragilidad Fraass (°C)	-13°C	EN 12593

Tabla 2. Propiedades de los áridos

Tipo	Propiedades	Resultado	Norma
Ofita (fracción gruesa)	Coficiente de Los Ángeles	13	EN 1097-2
	Peso específico	2,787	EN 1097-6
	Coficiente de pulimento (PSV)	60	EN 1097-8
	Índice de Lajas	8	EN 933-3
Ofita (fracción gruesa)	Coficiente de Los Ángeles	38	EN 1097-2
	Peso específico	2,705	EN 1097-6
	Coficiente de pulimento (PSV)	78	EN 933-8

Se realizaron ensayos de caracterización del material y se estudió su estabilidad térmica.

Tabla 3. Caracterización y estabilidad térmica del residuo curado

Humedad (NLT 102/98)	0,40%	
Peso específico (ISO 1183-1)	1,78 g/cm ³	
Temperatura	Duración	Pérdida de masa
200°C	6 horas	0,05%
300°C	6 horas	1,56%

3.1.2 Fibra de aramida residual

La fibra de aramida se caracteriza por tener una elevada resistencia a tracción y una elevada resistencia térmica en comparación con otro tipo de fibras sintéticas. Este tipo de fibras proporciona una elevada resistencia al desgaste y aunque presenta un aspecto de conglomerado (figura 2), está formada por fibras independientes que se desmenuzan fácilmente, de longitudes entre 0.5-1.2 mm.



Figura 2. Fibra de aramida residual

Tabla 4. Caracterización y estabilidad térmica del residuo curado

Humedad (NLT 102/98)	3 - 10%	
Peso específico (ISO 1183-1)	1,085 g/cm ³	
Temperatura	Duración	Pérdida de masa
200°C	6 horas	0,66%
300°C	6 horas	2,41%

Se realizaron ensayos de caracterización del material y se estudió su estabilidad térmica.

Se han realizado estudios de estabilidad térmica puesto que esta característica desempeña un papel fundamental en la reciclabilidad de la mezcla bituminosa. Este factor es relevante porque permite que las fibras no se degraden ni pierdan funcionalidad y facilitan su reutilización promoviendo un ciclo de vida más largo. Además, garantiza que las propiedades mecánicas del material no se vean afectadas.

3.2 Diseño de una mezcla altamente porosa con fibras residuales

Para llevar a cabo el desarrollo de la mezcla objetivo, se seleccionaron finalmente las fibras de aramida recicladas con las que ya se habían alcanzado resultados satisfactorios en mezclas porosas convencionales, ya que son menos susceptibles al daño causado por el agua, característica importante a tener en cuenta en el diseño de mezclas bituminosas. Además de su elevada resistencia térmica y buena trabajabilidad, la inclusión de estas fibras tenía como objetivo realizar parte de la función que tiene el mástico bituminoso, a la hora de conseguir un contenido de huecos en mezcla de 28% evitar el escurrimiento del betún y reforzar su estabilidad estructural. Tal y como se indica en el apartado 3.1, para la fabricación de las mezclas objeto de estudio, se ha utilizado un ligante modificado de tipo PMB 45/80-65 y áridos ofíticos para la fracción gruesa y calizos para la fracción fina y el filler.

Ante la ausencia de normativa para la adición de fibras residuales a las mezclas bituminosas y con el obje-

tivo de no generar procesos adicionales ni sobrecostos sobre el desarrollo de la mezcla ultraporosa, se ha seguido el procedimiento de fabricación estandarizado para mezclas porosas convencionales. El proceso de mezcla se ha llevado a cabo en el laboratorio, introduciendo los áridos previamente, seguidos de las fibras de aramida, el ligante y en último lugar el filler.

Para la caracterización de las mezclas, se llevaron a cabo los ensayos de establecidos por el PG-3 para comprobar que se cumplía con los requisitos mínimos: huecos (EN 12697-8), sensibilidad al agua (12697-12), escurrimiento del ligante (EN 12697-18) y pérdida de partículas en húmedo y seco (EN 12697-17).

3.2.1 Densidad y huecos

La fabricación de probetas de ensayo se realizó conforme a la norma UNE-EN 12697-30 (50 golpes por cara) a 160°C. Se comprueban las propiedades volumétricas y el porcentaje de huecos según la norma UNE-EN 12697-6 y UNE-EN 12697-8.

Tabla 5. Resultados densidad y huecos

Densidad (g/cm ³)	Huecos (%)
1,833	28,6

Para lograr un porcentaje de huecos del 28%, se ajustó la distribución granulométrica, lo que implicó desviarse del rango granulométrico establecido (figura 3).

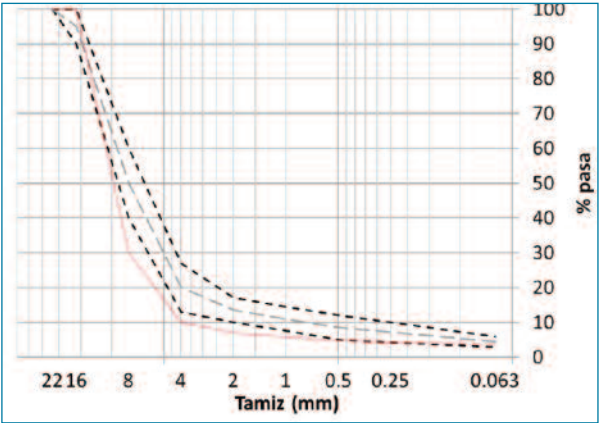


Figura 3. Granulometría ultraporosa

Como indican diversas referencias bibliográficas, el tamiz 8 se considera un factor clave en el diseño de este tipo de mezclas con respecto a la permeabilidad. Este tamiz, tiene mayor influencia en el diámetro del poro y este diámetro afecta directamente a la capacidad de drenaje del pavimento. Así pues, aumentar el porcentaje de material retenido en el tamiz 8 mm optimizaría los parámetros de microestructura y, a su vez, mejoraría la capacidad de drenaje del pavimento de asfalto poroso.

Con esta modificación fue necesario incrementar el contenido de ligante hasta un 5,3% de betún sobre mezcla, respecto de la dosificación estándar para mezclas porosas convencionales, con la incorporación de un 0,05% de fibras recicladas de aramida.

Hasta llegar a la optimización de la mezcla diseñada, se desarrollaron otras dos mezclas con porcentajes de huecos de 26% y 30% respectivamente. En el primer caso, la permeabilidad se vio reducida considerablemente, mientras que, en el segundo caso, la mezcla presentaba escurrimiento incluso al aumentar el porcentaje de fibras, además de un rendimiento mecánico insuficiente respecto al ensayo de pérdida de partículas (figura 4).

3.2.2 Ensayo Cántabro

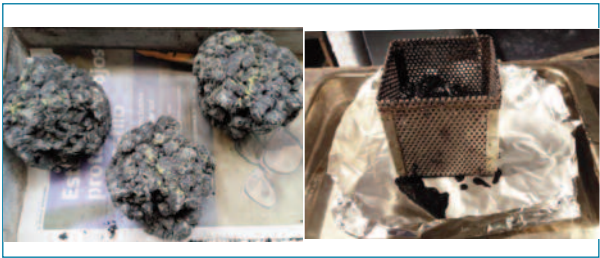


Figura 4. Resultados fallidos de mezcla ultraporosa

Una de las características estructurales fundamentales de la capa de rodadura de cualquier firme debe ser una adecuada resistencia a los esfuerzos tangenciales originados principalmente por el frenado, la aceleración y la maniobra de los vehículos los cuales afectan fundamentalmente produciendo su desgaste superficial. La elevada porosidad de este tipo de mezclas resulta en una menor superficie de contacto entre los áridos además de una disminución en la adherencia árido-ligante, por lo

que se considera esencial la evaluación de la pérdida de partículas mediante el ensayo Cántabro.

Tabla 6. Resultados Cántabro

Cántabro seco (%)	Cántabro húmedo (%)
16,8	23,5

3.2.3 Sensibilidad al agua

Las mezclas altamente porosas están diseñadas para permitir el drenaje del agua, lo que implica que están constantemente expuestas a humedad y agua infiltrada. El ensayo de sensibilidad al agua permite determinar la adhesividad árido-ligante bajo unas determinadas condiciones, evaluando así su capacidad para resistir daños por humedad prolongada o ciclos de humectación y secado. La susceptibilidad al agua de la mezcla fabricada se evalúa mediante el ensayo de sensibilidad al agua UNE EN 12697- 12 a 15°C.

Tabla 7. Resultados sensibilidad al agua

ITSw (kPa)	ITSd (kPa)	ITSR (%)
743,9	779,2	95%

3.2.4 Resistencia al derrame de combustibles

Este tipo de mezclas se suelen utilizar en entornos urbanos, por los múltiples beneficios que ofrecen ya que responden a las necesidades de estas áreas densamente pobladas. Sin embargo, estas áreas urbanas, donde el tráfico es más denso y hay una mayor concentración de vehículos, el riesgo de derrames de combustibles, aceites y otros líquidos es significativamente mayor.

La resistencia al derrame de combustibles en las mezclas bituminosas es un aspecto crítico, en general los pavimentos presentan una escasa resistencia ante el derrame de combustibles y lubricantes, condicionando su aplicación en estaciones de servicio, hangares, garajes, aparcamientos y otras zonas con alto riesgo de vertido. Por ello, se ha creído conveniente realizar el ensayo de resistencia al derrame de combustibles tomando como referencia una mezcla porosa convencional.

3.2.5 Permeabilidad

Los huecos interconectados son el elemento distintivo que convierte a las mezclas porosas en soluciones

Tabla 8. Resultados resistencia al derrame de combustibles

	Referencia	Mezcla ultraporosa
Resistencia al derrame de combustibles (%)	11,4%	6,6%

multifuncionales, ya que desempeñan un papel crucial en su funcionalidad y efectividad. Estas estructuras internas, que permiten la comunicación entre los poros individuales, aportan múltiples beneficios ya que evitan la acumulación de agua en la superficie y reducen las escorrentías contribuyendo a la infiltración del agua. Su diseño y mantenimiento adecuado son clave para maximizar el rendimiento y la durabilidad de la mezcla.

Para determinar la permeabilidad de la mezcla ultraporosa, se ha controlado el tiempo que tarda un determinado volumen de agua en atravesar una probeta de tipo Marshall. Para realizar este ensayo se ha utilizado el equipo que se muestra en la figura 5. El procedimiento consiste en determinar la velocidad de vaciado (mm/s) del volumen de agua determinado por las marcas del cilindro por efecto de la gravedad.

Para garantizar el paso del agua a través de las muestras tipo Marshall, todos los puntos de contacto y juntas de los elementos empleados para el ensayo han sido sellados herméticamente.

Los resultados de permeabilidad obtenidos para la mezcla diseñada se presentan en la siguiente tabla, con un comparativo entre las mezclas porosas convencionales que sitúan su drenabilidad en los 200-300 litros/min·m² y las soluciones existentes de hormigón poroso que se sitúan en torno a 120-700 litros/m²/min (0,2-1,2 cm/s) de acuerdo con la bibliografía.

Frente a las múltiples ventajas que presentan los pavimentos permeables, este tipo de mezclas también presentan algún inconveniente. El riesgo de colmatación de los huecos de este tipo de mezclas tiene lugar cuando estos se llenan parcial o completamente con partículas de polvo, suciedad, restos vegetales u otros residuos, provocando una reducción de su capacidad de infiltra-

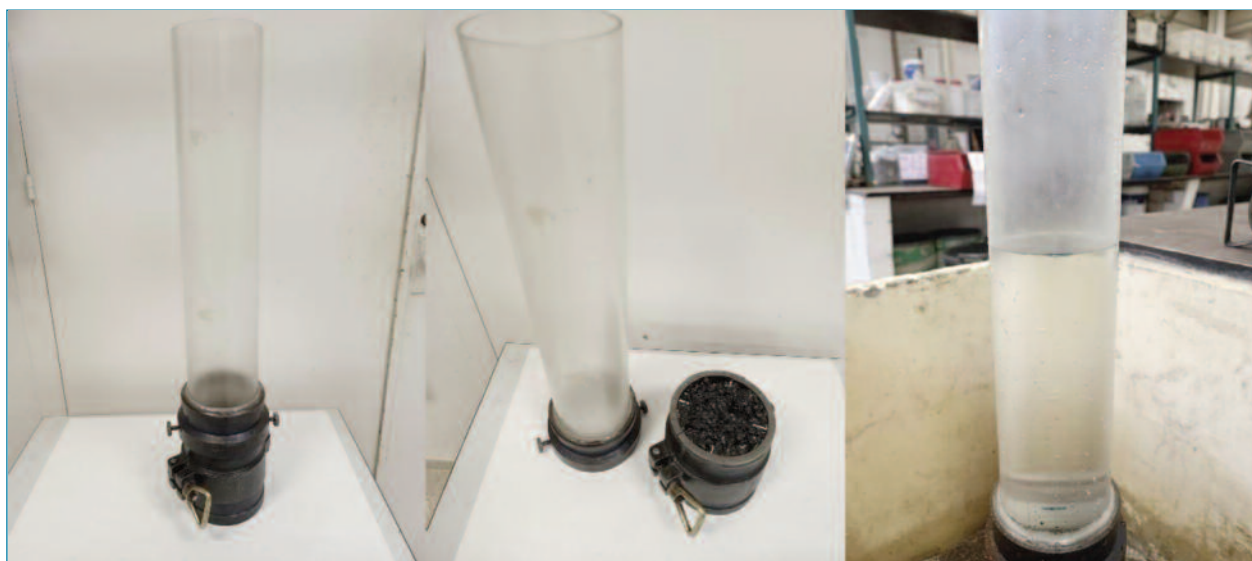


Figura 5. Equipo de medición de la permeabilidad.

Tabla 9. Resultados comparativos de permeabilidad

	Referencia porosa	Ultraporosa	Hormigón poroso
Permeabilidad litros/min·m ²	250-300	597,7	120-700

ción a lo largo del tiempo. Además, la colmatación de huecos puede provocar un almacenamiento de agua que no ha sido evacuada aumentando el riesgo de hidrolapneo y además contribuir a una erosión acelerada del pavimento.

Frente a este inconveniente, es fundamental que en el diseño de este tipo de mezclas altamente porosas se considere un adecuado plan de mantenimiento que permita garantizar sus ventajas competitivas frente a otras convencionales. En este sentido, la mezcla diseñada es ideal para mitigar problemas de escorrentía en entornos urbanos, donde la impermeabilización del suelo es común reduciendo el riesgo de inundaciones y encharcamientos en calles y plazas. Además, por su elevado contenido de huecos permite reducir el ruido generado por el tráfico rodado, un factor importante en zonas urbanas donde los niveles de contaminación acústica pueden ser elevados.

3.3 Estudio de reciclabilidad

Se ha considerado el estudio de la reciclabilidad de la mezcla un estudio fundamental ya que nos permite desarrollar nuevas mezclas reutilizadas, y comprobar que sus

propiedades mecánicas son similares o incluso mejores garantizando su funcionalidad y durabilidad a largo plazo.

Para llevar a cabo el procedimiento, se ha envejecido la mezcla ultraporosa mediante la norma AASHTO R 30-02 (figura 6). El material envejecido se ha añadido como RA, reemplazando un 30% de material virgen en una nueva dosificación de la mezcla ultraporosa.

Respecto a los resultados, se ha conseguido obtener el porcentaje de huecos objetivo. Cabe destacar que la mezcla conteniendo elevadas tasas de RA presenta mayores resistencias a tracción indirecta en el ensayo de sensibilidad al agua, tanto en condiciones secas como húmedas. Este resultado era previsible, ya que la adición de 30% de RA hace que su comportamiento se rigidice y aumente su resistencia.

En el transcurso de la investigación, se ha comprobado que el uso de betunes más blandos para contrarrestar el envejecimiento del betún procedente del material reutilizado y evitar la rigidización excesiva de la nueva mezcla puede ser necesario en algún caso. No se observan diferencias significativas en su comportamiento mecánico, y la presencia de fibras no afecta a la reciclabilidad.



Figura 6. Envejecimiento para reciclabilidad de la mezcla ultraporosa

Tabla 10. Resultados de la mezcla con 30% RA

Betún s/m (%)	3,8
Densidad (g/cm ³)	1,821
Huecos (%)	28,0
Cántabro seco (%)	17,9
Cántabro húmedo (%)	25,1
ITS seco (kPa)	919
ITS húmedo (kPa)	885
Escurrimiento (%)	0,0

4. TRAMO DE PRUEBA

Hasta el momento, y a la espera de la ejecución del tramo en campo, se ha realizado una prueba preliminar a pequeña escala. Esta fase inicial ha tenido como objetivo comprobar la idoneidad de la formulación en planta, confirmando que las fibras quedan completamente envueltas y que las características superficiales del pavimento cumplen de manera satisfactoria con las especificaciones establecidas en el PG-3.



Figura 7. Prueba preliminar a pequeña escala.

5. CONCLUSIONES

Se ha conseguido desarrollar una mezcla ultraporosa con un 28% de huecos, con una capacidad de evacuación de agua de 600 litros/min·m², similar a las soluciones de hormigón poroso ya existentes en el mercado conteniendo una proporción de 0,05% de fibras recicladas.

Se ha alcanzado un equilibrio en el diseño entre la existencia de huecos interconectados y la estabilidad estructural y mecánica sostenible en el tiempo que cumple con los requisitos mínimos establecidos en el PG-3 para mezclas porosas.

En los próximos meses, antes de finalizar el año 2025, se va a desarrollar en el marco del proyecto Tecnocir un tramo de prueba en condiciones reales con la mezcla ultraporosa desarrollada específicamente para abordar problemas de escorrentía existentes en zonas vulnerables de la Comunidad Valenciana. Este tramo de prueba nos permitirá evaluar el desempeño de la mezcla en escenarios reales, poniendo a prueba su capacidad de drenaje, resistencia mecánica y durabilidad en entornos con condiciones adversas. En el transcurso de la investigación, se ha comprobado que el uso de betunes más blandos para contrarrestar el envejecimiento del betún procedente del material reutilizado y evitar la rigidización excesiva de la nueva mezcla puede ser necesario en algún caso. No se observan diferencias significativas en su comportamiento mecánico, y la presencia de fibras no afecta a la reciclabilidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Monografía “Metodología de adaptación al cambio climático en carreteras”.
- [2] Yue Zhou, Zhiqiang Cheng, Xiaoguang Zheng, Tao

Wang, Xiaoliang Wu, Xiaoxiao Yu, Shengjia Xie. "A Holistic Exploration of Porous Asphalt Mixtures: From Durability and Permeability to Low-Temperature and Functional Properties."

[3] Tesis doctoral Jorge Rodríguez Hernández; Daniel Castro Fresno, Miguel Ángel Calzada Pérez. "Estudio, análisis, diseño, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros."

#22

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

"Innovaciones como las de las mezclas semicalientes reducen consumo de energía y emisiones"(Mezcla reciclada semicaliente de tasa media)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE