

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS SOSTENIBLES – PAS (FÉNIX PROJECT).

C.Cortés, J.M.Cadenas
Servià Cantó S.A, Spain, ccortesfu@fcc.es
C.García
Collosa, Spain
P.Pascual, D. Castro-Fresno, A.V. Novo
GITECO, University of Cantabria, Spain
J.J.Potti
Proyecto Fénix, Spain

RESUMEN

La red de carreteras Española está integrada por 163.577 kilómetros de autopistas, carreteras de doble camino y carreteras convencionales que se utilizan sólo para el transporte de mercancías y personas. Existen estudios que exponen que la superficie de las carreteras españolas recibe todos los días de verano la radiación solar equivalente a 7.000 GWh [1]. Sin embargo, no existe ningún procedimiento para aprovechar la energía recibida en la superficie de la carretera.

Los Pavimentos Asfálticos Sostenibles (PAS), que se describe en este documento, es un sistema diseñado para capturar y almacenar la energía solar irradiada sobre la superficie de la carretera en forma de calor para su uso posterior. El sistema PAS se compone de tres partes principales: captación solar, almacenamiento de calor y la eficiencia energética.

La captación de energía se realiza a través de una superficie de asfalto especial que recibe la radiación solar y es capaz de transmitir el calor recibido en el área de almacenamiento. El almacenamiento de calor tiene lugar en la sub-base porosa colocada debajo de la superficie de captación. El aprovechamiento de la energía se lleva a cabo a través de un intercambiador de calor, que permite su uso como agua caliente.

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo resume la investigación realizada en la tarea denominada "Pavimentos Asfálticos Sostenible" dentro del proyecto "INVESTIGACIÓN ESTRATÉGICA EN CARRETERAS MÁS SEGURAS Y SOSTENIBLES", financiado por el gobierno español en la convocatoria CENIT-2007.

Existen cálculos que indican que la superficie de las carreteras españolas recibe cada día de verano una radiación solar equivalente a unos 7000 Gwh. Esta cantidad es 200 veces superior a la energía diaria generada por cualquier central nuclear de tamaño medio en España -. Sin embargo no existe ningún procedimiento que permita el aprovechamiento de esta energía.

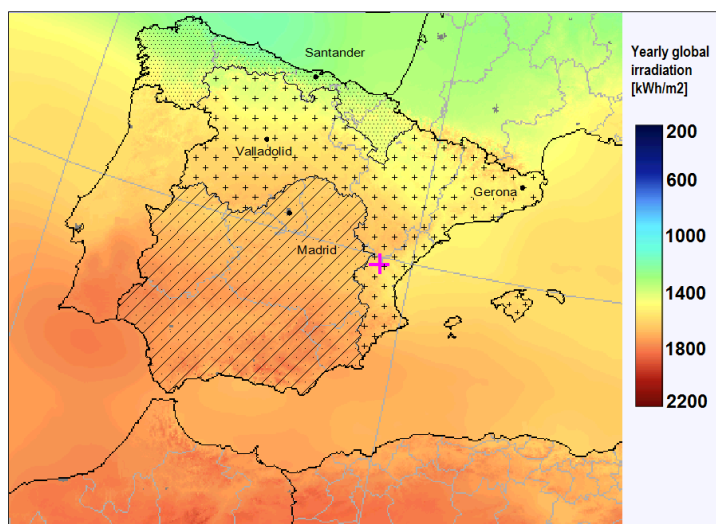


Figura 1 - Imagen con la irradiancia recibida en al superficie de la península ibérica

En las carreteras confluyen/participan diferentes tipos de energía durante su vida útil que pueden ser objeto de reutilización o de aprovechamiento. Más concretamente, esta energía puede dividirse en tres tipos: energía **solar** que recibe la superficie del aglomerado asfáltico; **energía térmica** procedente también del sol y que produce un gradiente de temperatura en el espesor de la carretera; y, finalmente, puede considerarse la **energía mecánica** procedente de las cargas y vibraciones de los vehículos que circulan por la superficie de la carretera. El concepto de *Energy Harvesting* consiste en el posible aprovechamiento de estos tipos de energía en otros fines, dando de esta manera un valor añadido a la carretera.

En este caso, y considerando que la temperatura de la superficie del pavimento es, generalmente, entre 20 y 30°C superior a la del aire debido a la absorción de la energía solar, especialmente en verano [2] se puede plantear la posibilidad de aprovechar este tipo de energía. En este marco de trabajo se aplica la idea de captar energía del sol para almacenarla y utilizarla tiempo después, así como la de hacer circular agua caliente bajo la superficie del pavimento para aprovechar su energía calorífica.

2. SUBTAREAS

2.1. Tarea 1.1: CAPTACIÓN

Se ha desarrollado en los últimos años una tecnología capaz de captar energía calorífica del sol en verano mediante el uso de una superficie apta para ello, como el asfalto, y almacenarlo en el terreno para calentar edificios en invierno. La energía solar se convierte, pues, en energía utilizable a lo largo del tiempo. En este caso utilizan como sistema de captación el compuesto por una red de tuberías bajo el asfalto por las que circula agua y un sistema de almacenamiento compuesto por otra red de tuberías (ver figura 1).



Figura 2 - Colector asfáltico en Rotterdam [3].

Además del uso de la energía almacenada para el posterior acondicionamiento de edificios, otra de las ventajas de este tipo de colector es el mantenimiento de la carretera (p.e. prevención de fisuras), sin olvidar, por supuesto, la reducción de las emisiones de CO₂ gracias al menor uso de combustibles fósiles.

Se ha realizado un estudio térmico y estructural para concretar las variables y parámetros necesarios en un pavimento para conseguir el objetivo marcado.

2.1.1 ESTUDIO TÉRMICO

La energía calorífica que puede ser captada por el colector asfáltico depende de un amplio número de parámetros: propiedades térmicas de los materiales y circunstancias ambientales, principalmente.

Para el cálculo o predicción del gradiente de temperaturas se recurre, a lo largo de la bibliografía, a la simulación de modelos teóricos o, más específicamente para el caso de sistemas de captación, a la utilización del método de elementos finitos. Otros métodos de cálculo de temperaturas se pueden utilizar como la medición directa en el emplazamiento deseado mediante termopares o instrumentos similares.

2.1.2 ESTUDIO ESTRUCTURAL

El análisis estructural recogido en la bibliografía estudia la respuesta mecánica de los sistemas de captación de calor a las cargas aplicadas por los vehículos que circulan sobre el pavimento y a la distribución de temperaturas presente. Las conclusiones a este análisis están basadas en los resultados obtenidos de la simulación por computador con programas de elementos finitos y la realización de diferentes ensayos de laboratorio.

Respecto al sistema de tubos empleado en las experiencias descritas anteriormente, además de conseguir un ahorro de energía, la implementación de esta tecnología permitiría aumentar la vida del pavimento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que a la vez se están introduciendo elementos que lo debilitan. Van Bijsterveld et al. [4] se centran en investigar el efecto que la presencia de tubos de polietileno provoca en la estructura del pavimento. El análisis realizado por Van Bijsterveld y De Bondt [5] coincide con el artículo anterior al determinar que la presencia de tubos en el asfalto influye negativamente en la durabilidad de la estructura del pavimento.

Estos sistemas presentan importantes problemas tecnológicos y funcionales a resolver. El primero de ellos es la baja eficiencia que ofrecen estos sistemas de captación, que se encuentra en torno al 25%. Ello se debe principalmente al bajo rendimiento de transmisión térmica causado por la reducida superficie de contacto entre los tubos por los que circula el fluido caloportador y el material que conforma el pavimento. Es decir, se desaprovecha una gran parte de la superficie potencial de irradiación.

El segundo problema es la dificultad constructiva resultante al tener que embeber la red de tuberías por debajo de la superficie del pavimento. La técnica actual exige colocar los tubos de forma plegada para maximizar la superficie de contacto y utilizar una malla soporte hasta que se vierte el material de pavimentación (mezcla bituminosa u hormigón) que constituye la base principal del pavimento. Asimismo, los tubos no pueden colocarse muy cerca de la superficie porque el peso de los vehículos podría dañarlos, de modo que tienen que colocarse a cierta profundidad, lo que repercute negativamente en el rendimiento del sistema.

El tercer problema lo forman las dificultades de mantenimiento y la poca fiabilidad de funcionamiento. Cualquier avería en la red de tuberías, por pequeña que sea, implica tener que levantar el pavimento, sustituir o reparar la tubería dañada y pavimentar de nuevo la zona afectada. A su vez, la rotura de un solo tubo corta toda la circulación del fluido caloportador, provocando una avería general que significa la interrupción de todo el sistema. A dichos inconvenientes hay que añadir las dificultades de reciclar cualquier material de la red de tuberías, ya que su separación respecto del pavimento es complicada, y en muchas ocasiones destructiva.

En este punto de la investigación surge la posibilidad de combinar el know-how de las empresas participantes en la investigación con la capacidad de innovación de la universidad. En el marco del proyecto aparece la idea de combinar la capacidad drenante de ciertas capas de aglomerado asfáltico diseñadas para la evacuación rápida del agua de lluvia de la superficie de la carretera con la captación de calor de superficies negras. Esta conjunción de conceptos provocó la aparición del pavimento "sandwich". El pavimento *sandwich* consiste en:

- una capa superior configurada para absorber la energía solar irradiada sobre la superficie de captación;
- una capa intermedia de carácter poroso dispuesta bajo la capa superior, configurada para permitir la libre circulación a través de la misma de un fluido caloportador que recibe la energía solar absorbida por la capa superior y la transporta hasta un módulo de almacenamiento o directamente hasta un módulo de aprovechamiento energético; y
- una base inferior impermeable y con capacidad portante dispuesta bajo la capa intermedia, configurada para impedir las infiltraciones del fluido caloportador que fluye sobre dicha base inferior y para soportar el peso de todas las capas que se encuentren por encima de la misma, así como todas las cargas previstas para su uso.

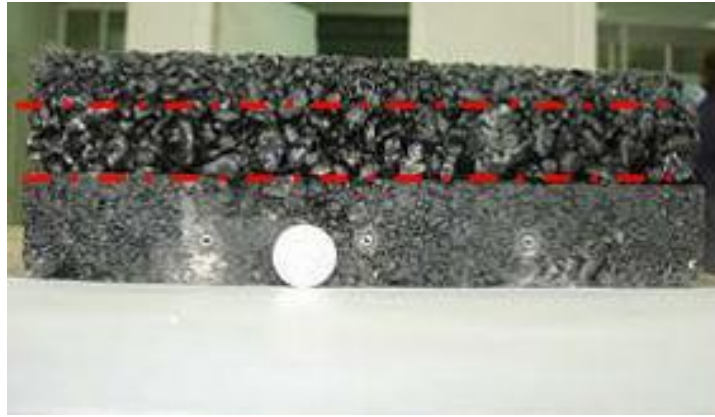


Figura 3 - Probeta de pavimento *sandwich*

La característica esencial es que el fluido caloportador circula libremente a través de la capa intermedia, fluyendo sobre la base inferior hasta el módulo de almacenamiento o de aprovechamiento energético, sin necesidad de emplear una red de tuberías para ello. De este modo el fluido caloportador aprovecha toda la superficie de captación, recibiendo la energía solar absorbida por la capa superior.

2.1.3 ENSAYO DE CARGA Y DESCARGA PARA PROBETAS SANDWICH

La probeta de ensayo utilizada es una probeta *sandwich* como la descrita anteriormente de 30x40 cm y con un contenido de huecos del 23 y del 27%.

La duración de cada ensayo fue de 6 horas. Durante los ensayos se han registrado de manera continua los datos de la temperatura en superficie de la probeta, la temperatura del agua a la entrada y a la salida, la temperatura y humedad ambiente y el caudal de agua a la salida de la probeta.

La energía irradiada por la lámpara sobre la probeta depende de cada ensayo: para la probeta corta con 23% de huecos se utilizó 300, 380 y 450 W/m²; mientras que para las probetas corta y larga con 27% se utilizó 380W/m², ya que el objetivo era conseguir un aumento del caudal respecto a los ensayos anteriores.



Figura 4 - Ensayo Termohidráulico.

Los resultados obtenidos para las probetas con un 23% y un 27 % de huecos se pueden apreciar en la siguiente figura.

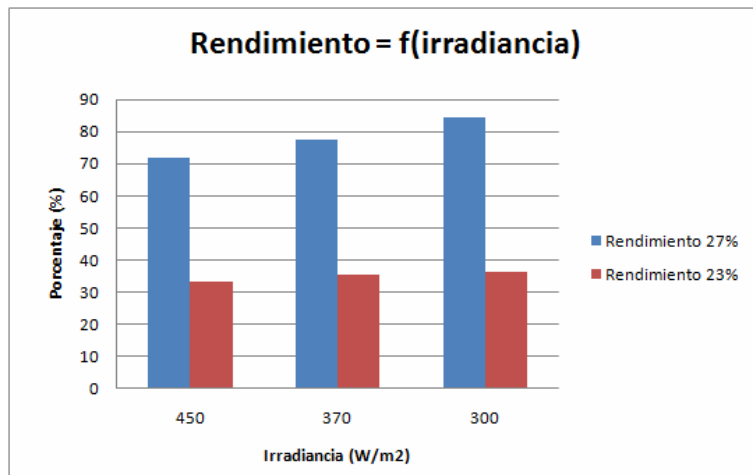


Figura 5 - Comparación de los rendimientos de los dos tipos de probetas.

Una última serie de ensayos se han realizado con una probeta de 30x80 cm y con 0.06 bares de presión. En este caso se producen problemas de fugas por las juntas de la tela asfáltica. Por esta razón se realiza el mismo ensayo pero sin presión.

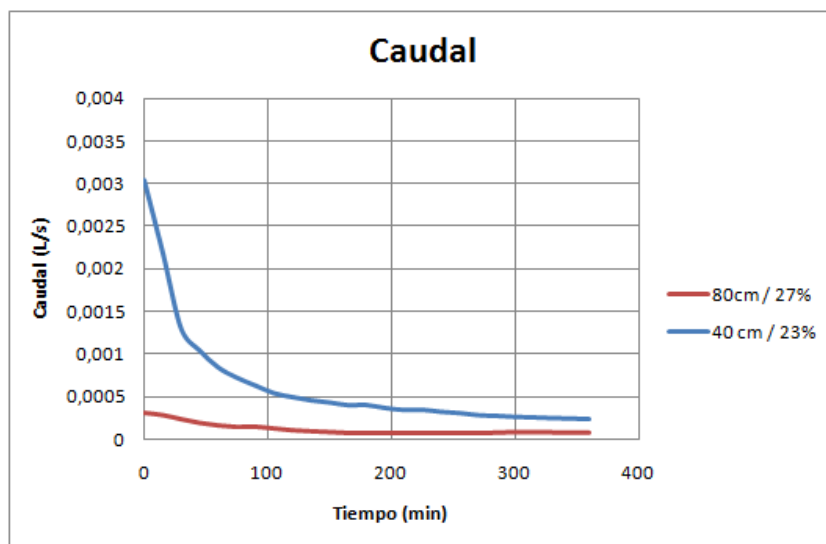


Figura 6 - Representación del caudal en las probetas de 40cm y 23% Huecos y de 80cm y 27% Huecos.

Los resultados obtenidos permiten concluir que a partir de las 2 horas de ensayo, los valores de caudal, gradiente de temperatura y potencia de salida obtenidos para la probeta larga con 27% de huecos, se acercan a los obtenidos en los ensayos para la probeta corta con 23% de huecos.

2.2. Tarea 2: ALMACENAMIENTO

La energía proveniente del sol es intermitente (meteorología, ciclos noche y día, movimientos de traslación de la tierra, etc.) por lo que la mayoría de los sistemas de captación de energía solar llevan asociados un sistema de almacenamiento para satisfacer las demandas energéticas en el momento que estas sean requeridas. De este modo se evitan las fluctuaciones de esta fuente haciendo posible el uso energético

posterior a su captación. También aporta una mayor efectividad al sistema térmico, reduciendo las pérdidas de calor residual al existir un medio de almacenaje.

Los sistemas de almacenamiento de calor son variados y responden a las diversas tecnologías desarrolladas en el campo de la energía solar y geotérmica. El almacenamiento de la energía solar se puede hacer [6]:

- En forma de calor sensible, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso.
- En forma de calor latente, como la energía almacenada hasta alcanzar la temperatura a la cual se produce el cambio de estado de una sustancia.
- En forma de calor sensible y latente, en el que el calor almacenado entraña una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido o líquido); la restitución del calor corresponde al cambio de estado inverso.
- En forma de energía química originada en algunas reacciones químicas.
- En forma de energía mecánica que se puede transformar en energía potencial mediante el almacenamiento de fluidos a ciertas alturas.
- En forma de sustancias obtenidas en procesos solares no energéticos, como el agua destilada en un alambique solar que se puede almacenar en depósitos para su utilización posterior.

Se estudia la posibilidad de almacenar calor sensible en la subbase de un firme permeable, compuesta por grava y agua. En la fase de ensayos se construye un molde de dimensiones 0.5 m x 0.5 m x 0,68 m de material rígido e impermeable cubierto con material aislante (paneles rígidos, mantas compactas o proyectados) en todas sus caras excepto en la superficie. El molde estará relleno de capas correspondientes a la que se encuentra en los firmes permeables, en idénticos espesores y materiales empleados para la construcción a escala real de los mismos.



Figura 7 - Tanque de almacenamiento de energía térmica de laboratorio.

La primera capa en la superficie corresponde a pavimentos permeable utilizado en el estudio: asfalto poroso. Las capas sucesivas están formadas por gravilla, un geotextil de separación y zahorra drenante.

Se aplica una fuente de calor desde el interior de la subbase mediante una resistencia eléctrica que simula la introducción de un intercambiador de calor, por cuyos tubos circula el agua caliente proveniente del colector solar. Se recogerán medidas en continuo de temperatura a distintas distancias de la superficie a lo largo de todo el firme permeable.

Se realizan medidas de temperatura en diferentes puntos del firme en función de los flujos de calor aplicados. También se recogerán medidas de nivel de agua en la subbase del firme permeable para obtener datos de pérdida de calor por evaporación de agua, así como datos sobre temperatura del aire y humedad.

Las temperaturas programadas para los ensayos son: 30 °C y 50 °C; y el calentamiento se produce hasta obtener aproximadamente la temperatura programada en las cuatro sondas.

Las curvas de enfriamiento se recogen a partir del instante en que las tres sondas de temperatura superiores alcanzan la temperatura establecida para cada ensayo durante el calentamiento, asumiendo que el depósito se encuentra en estado estacionario a la temperatura de equilibrio correspondiente.

La representación de la temperatura alcanzada a la altura de las cuatro sondas durante los periodos de calentamiento y enfriamiento del depósito reflejan la poca estratificación producida, es decir, fluidos con flujos convectivos lentos donde puede asumirse que el fenómeno predominante de transmisión de calor es debido a conducción, y el modelo mixto de las leyes de mezcla en la transferencia de calor resulta apropiado. Los resultados del cálculo del rendimiento del sistema durante el calentamiento para cada ensayo realizado se representan en la siguiente figura.

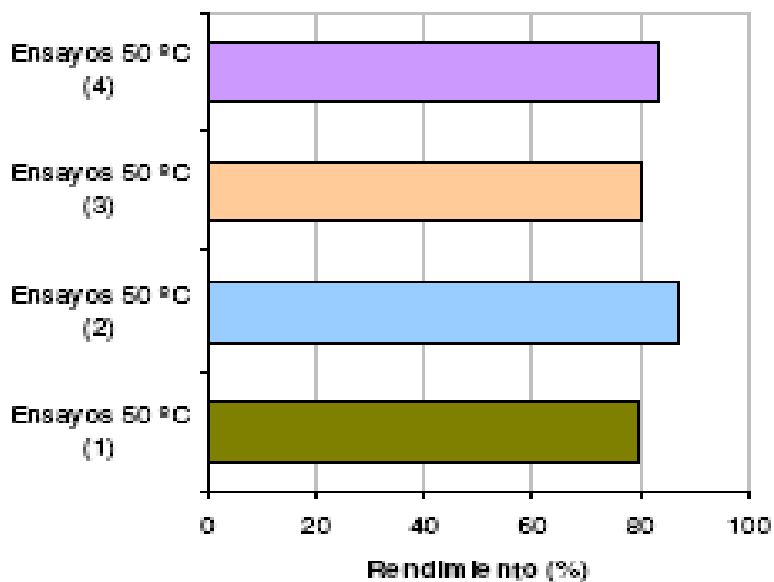


Figura 8 - Rendimiento del calor almacenado durante el calentamiento.

2.3. Tarea 3: APROVECHAMIENTO

Para la realización del tramo de prueba se basa en un diseño que integra la captación y el almacenamiento. El circuito diseñado es un circuito primario en el que la energía captada por el módulo de captación va a ser enviada a un modulo de almacenamiento tal que va a ceder la energía a las aguas sanitarias de un vestuario.

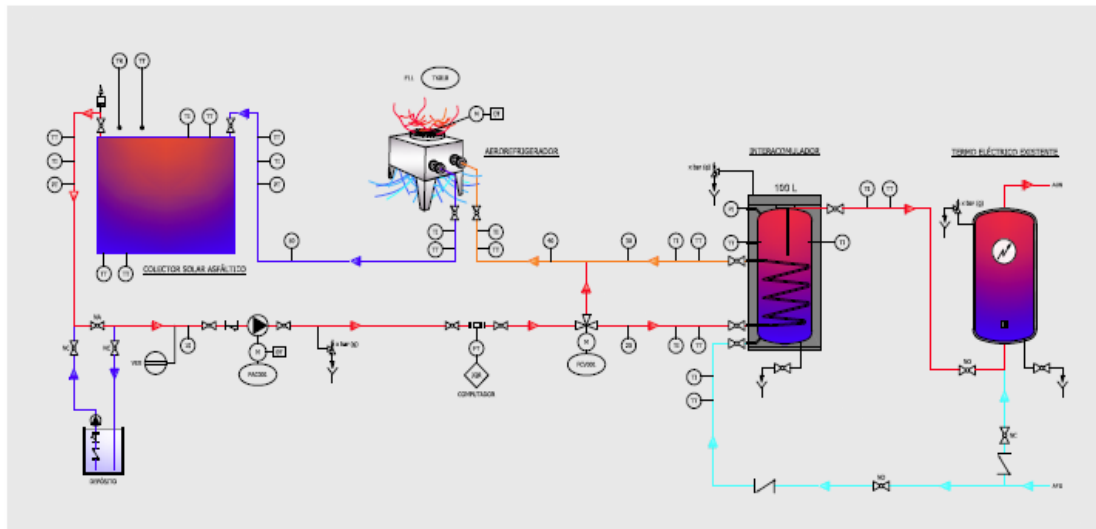


Figura 9 - Esquema del sistema.

El módulo de captación consiste en una placa de 6x8 m que recoge la irradiación solar y transmite la energía al fluido caloportador. Este fluido intercambia la energía recibida con la ACS en el módulo de almacenamiento. Además se ha incluido en el sistema un aerogenerador que nos permite modificar la demanda final de energía que se le exige al sistema. De esta manera y mediante las sondas de control instaladas, podemos estudiar el rendimiento energético de todo el sistema.

Aunque en la actualidad estamos monitoreando el tramo de prueba en diferentes condiciones ambientales externas, se prevé que con respecto al análisis costo-beneficio finalmente el balance sea positivo en cuanto tengamos más datos para realizar este análisis. No en vano, cabe destacar que es la primera vez que se implementa una instalación de tipo PAS en el mundo. Será, pues, tras un período de tiempo más o menos prolongado cuando podrán hacerse este tipo de consideraciones. Sin embargo, si conviene hacer hincapié en ciertos aspectos del tema.

En lo que a los costes respecta, por ejemplo, estos se refieren en su mayoría a la construcción del pavimento tricapa y a la instalación de la maquinaria necesaria. La construcción del pavimento se realiza de forma normal, únicamente existe un aumento del coste en lo referente a la impermeabilización. Por otra parte, el coste asociado tanto al uso del sistema como a su mantenimiento es limitado. Así, en el primer caso, los equipos que componen la maquinaria del sistema (bombas de circulación y otros) son equipos de poco consumo eléctrico o, en su defecto, equipos de alta eficiencia energética. Llegado el caso, podría tratarse incluso de alimentar los equipos con energías también renovables, como la fotovoltaica o la mini eólica. Finalmente, el coste de mantenimiento será también menor, tanto desde el punto de vista del pavimento como de la instalación, atendiendo sobre todo a la poca complejidad de esta.

Por otra parte, la utilización del instrumental de medida necesario para obtener valores característicos como las temperaturas de entrada y salida al pavimento o el caudal del fluido caloportador, permitirán tras un cierto período de tiempo, determinar la energía necesaria para abastecer de ACS el edificio en cuestión. Un estudio comparativo entre este dato, los costes asociados antes mencionados y el dato de la energía que sería necesaria para el abastecimiento de ACS por medios convencionales, permitirán a su vez obtener el beneficio para este tipo de instalaciones. En nuestro caso, se está analizando los costes que nos podemos ahorrar en cuanto al consumo de agua caliente sanitaria en los vestuarios de la instalación.

No obstante, el objetivo de esta investigación no era tanto la consecución de altos beneficios económicos, como de beneficios ambientales, tecnológicos y de eficiencia energética. Así, la eliminación mediante la utilización del sistema PAS de las emisiones asociadas a la quema de combustibles fósiles utilizados en los métodos convencionales, hacen del ambiental un factor determinante a la hora de evaluar su eficacia. Además, una inversión ligeramente superior, necesaria para la construcción de un pavimento tipo PAS, le dará a una infraestructura (carretera o aparcamiento, como en este caso) ya de por sí imprescindible, una mucho mayor funcionalidad. Es decir, una vez ha quedado constatada la necesidad de pavimentar un área determinada, y existiendo además en esa zona ciertos servicios que impongan la presencia de edificios de cualquier tipo, la construcción de un sistema limpio y eficiente que abastezca ACS le da al pavimento un valor añadido muy a tener en cuenta.

Respecto al debilitamiento de la sección del pavimento, este tipo de pavimentos están, hasta la fecha, diseñados para soportar cargas de vehículo ligeros. Además, al estar aplicado hasta la fecha únicamente en aparcamientos, donde las cargas son menores, la resistencia de la sección está asegurada. Desde el punto de vista de la posibilidad de que el agua caliente pueda llevarse material (betún o áridos) perteneciente a la sección permeable, cabe mencionar que los análisis llevados a cabo en el laboratorio hasta la fecha descartan dicha posibilidad. Además, las presiones ejercidas sobre el fluido caloportador son lo suficientemente pequeñas como para asegurar que no va a tener lugar el arrastre del material. Por otra parte, la utilización de un betún de tipo modificado que permita una buena envuelta del árido minimiza aún más esta posibilidad.

3. CONCLUSIONES

A continuación se extraen las principales conclusiones del estudio llevado a cabo.

- Los rendimientos obtenidos en los diferentes ensayos acometidos con la probeta sándwich son muy elevados, con valores alrededor del 80% para la configuración del 27% de huecos en la probeta de 40cm.
- El valor del caudal obtenido cuando la probeta alcanza el régimen permanente o cuasi-permanente es muy pequeño.
- Los valores bajos de caudal hacen disminuir el rendimiento del PAS, incluso con el aumento de la radiación sobre la probeta.
- Los resultados muestran que se puede obtener un rendimiento de calor aportado al sistema del 70-80% durante el calentamiento hasta la máxima temperatura del rango de operación.
- A partir de las 2 horas de ensayo, los valores de caudal, gradiente de temperatura y potencia de salida obtenidos para la probeta larga con 27% de huecos, se acercan a los obtenidos en los ensayos para la probeta corta con 23% de huecos.

AGRADECIMIENTOS

La realización del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es) ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

Los autores quieren agradecer a todas las organizaciones y empresas participantes del Proyecto Fénix: Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos (CIESM) , Centro Zaragoza, Construcciones y Obras Llorente (Collosa), Ditecpesa, Asfaltos y Construcciones Elsan, Intrame, Pavasal, Repsol YPF, Sacyr, Servià Cantó, Sorigué, CARTIF, CEDEX, CIDAUT, CSIC (IIQAB), GIASA, Intromac, Labein, Universidad de Alcalá de Henares, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Castilla La Mancha, Universidad de Huelva, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad Politécnica de Madrid, y a sus numerosos colaboradores cuya capacidad de trabajo y eficacia están permitiendo el desarrollo de este Proyecto en un ambiente de cooperación.

BIBLIOGRAFIA

1. PVGIS, 2007.<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
2. Ongel, A. and Harvey, J.T. Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM). Draft report prepared for the California Department of Transportation. Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley, University of California Davis. UCPRC-RR-2004/05
3. De Bondt, A. y Jansen, R. (2006). Generation and saving of energy via asphalt pavement surfaces. Avenhorn (Holanda): Ooms Avenhorn Holding .
4. Van Bijsterveld, W.T., Houben, L.J.M., Scarpas, A. y Molenaar, A.A.A. (2001). Using Pavement as Solar Collector. Effect on pavement temperature and structural response. Transportation Research Record, 1778(17): 140-148.
5. Van Bijsterveld, W.T. y De Bondt, A. (2002). Structural aspects of asphalt pavement heating and cooling systems. Amsterdam (Holanda): Third International Symposium on 3D Finite Element Modeling, Design & Research.
6. Fernández, P. (1997). Energías Renovables. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.