

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos

Christian Cortés - Servià Cantó - ccortesfu@fcc.es
J. M. Cadenas - Servià Cantó
C. García - Collosa
D. Castro - GITECO, Universidad de Cantabria
P. Pascual - GITECO, Universidad de Cantabria
A. Vega - GITECO, Universidad de Cantabria
J. J. Potti - Proyecto Fénix

La red de carreteras española tiene una longitud superior a 160.000 km, correspondiente a autopistas, autovías y carreteras de una calzada, cuya misión es servir de soporte para el transporte de personas y mercancías. Existen estudios estimando que la superficie de las carreteras españolas recibe cada día de verano radiación solar equivalente a 7.000 GWh. Sin embargo, no existe ningún procedimiento capaz de aprovechar dicha energía, o al menos parte de ella, recibida sobre la superficie de la carretera. La tecnología que se describe en esta publicación es un sistema diseñado para capturar y almacenar la energía solar térmica irradiada sobre la superficie de la carretera para su posterior uso. El trabajo experimental realizado se ha centrado en el estudio de los rendimientos de captación energética y en el almacenamiento de la energía captada. Asimismo, se ha construido un tramo de prueba para verificar los resultados que se habían obtenido a escala de laboratorio. Las conclusiones más relevantes son que es posible la captación de la energía solar térmica mediante un pavimento por el que circula un fluido caloportador, alcanzándose rendimientos cercanos al 70% respecto a la energía irradiada sobre la superficie del pavimento.

The Spanish road network has a length of more than 160,000 km, including motorways and single carriageway roads, whose mission is to provide support for the transport of people and goods. Some studies estimate that each summer day the surface of Spanish roads receives solar radiation equivalent to 7,000 GWh. However, there is no procedure that can exploit this energy, or at least part of it, received on the road surface. The technology described in this publication is a system designed to capture and store solar energy irradiated on the surface of the road for later use. The experimental work has focused on studying the performance of energy and storage of the captured energy. It has also constructed a test section to verify the results that had been obtained at laboratory scale. The most relevant conclusions are that it is possible the capture of solar energy by mean of pavement through which circulates a heat transfer fluid, achieving yields close to 70% compared to the energy radiated on the pavement surface.

1. Introducción

Existen cálculos estimando que la superficie de las carreteras españolas recibe cada día de verano una radiación solar equivalente a unos 7.000 GWh (PVGIS, 2007). Esta cantidad es 200 veces superior a la energía diaria generada por la central nuclear de Santa María de Garoña, Burgos (España). Sin embargo, no existe ningún procedimiento que permita el aprovechamiento de esta energía.

Las carreteras reciben diferentes tipos de energía durante su vida útil, que pueden ser objeto de reutilización o de aprovechamiento. Entre los mismos, cabría destacar:

- La energía solar que recibe la superficie del aglomerado asfáltico, que dependiendo de la longitud de onda, se podría dividir en energía térmica y energía procedente de otras longitudes de onda (UV, etc).
- La energía mecánica procedente de las cargas y vibraciones de los vehículos que circulan por la superficie de la carretera.

Dentro de este contexto ha surgido el concepto de "Energy Harvesting", consistente en el posible aprovechamiento de estos tipos de energía, dando de esta manera un valor añadido a la carretera.

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos



Figura 1. Niveles de irradiación solar en la Península Ibérica.

Centrándonos en el caso de la energía solar térmica, 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, (Ongel, A. and Harvey, J.T., 2004) se puede plantear la posibilidad de aprovechar este tipo de energía.

Aunque no excesivamente numerosos, existen diversos antecedentes de aprovechamiento de la energía solar térmica recibida por los pavimentos. Sokolov y Reshef (1992) y Chaurasia (2000), mediante la colocación de tubos embebidos en bloques de hormigón, propusieron la utilización de éstos como colectores solares activos, proveedores de energía para, por ejemplo, calentar el agua o climatizar una vivienda a un coste bajo. Bilgen y Richard (2002), en cambio, estudiaron experimental y teóricamente la acción de la radiación solar sobre una losa de hormigón (funcionando como colector solar pasivo), estableciendo la influencia relativa de algunos parámetros en su comportamiento térmico.

La primera referencia de aplicación práctica de estas técnicas encontrada entre la bibliografía proviene de finales de los años setenta, en Estados Unidos, donde una patente con título "Paving and solar energy system" (Wendel, 1979) muestra un método para calentar el agua de una piscina haciendo circular este a través de unos tubos que pasan bajo un pavimento expuesto al sol.

Desde 1994, la planta piloto SERSO, ubicada en Suiza, previene la formación de hielo en un puente de autopista. Este sistema capta el calor absorbido por el pavimento en verano mediante unas tuberías de metal embebidas en él y lo almacena en tubos taladrados en la montaña a una cierta

profundidad. Durante el invierno, ese calor mantiene la temperatura del puente por encima del punto de congelación.

En Japón, el sistema denominado GAIA funciona con éxito en la ciudad de Ninohe desde 1995. Esta instalación está compuesta por unas tuberías embebidas en el pavimento, que captan parte de la energía solar absorbida por este, transportándolo a un intercambiador de calor coaxial enterrado en los alrededores, donde se almacena. En invierno, esta energía calorífica pasa por una bomba de calor y se hace circular a través de las tuberías situadas bajo el pavimento evitando su congelación.

Pero el principal avance llevado a cabo en este campo desde hasta la fecha ha llegado de la mano de la utilización de dicha energía para la climatización de edificios. Países Bajos y Reino Unido han sido las puntas de lanza de esta tecnología en Europa.

En Países Bajos, la investigación llevada a cabo por empresas y universidades ha sido muy amplia. Cabe destacar, en primer lugar, el estudio llevado a cabo por Van Bijsterveld et al. (2001), en el que se analiza el comportamiento de un colector asfáltico compuesto de tubos de material polimérico en su interior y la influencia en la distribución de temperaturas a través del asfalto de parámetros, tales como: profundidad de los tubos, distancia entre ellos o caudal del fluido a través de ellos. De este trabajo nacen los colectores asfálticos denominados "Road Energy System (RES)". Este sistema, desarrollado entre los años 1997 y 2001, consiste en una capa de mezcla bituminosa reforzada mediante una rejilla (grid) y atravesada por unos tubos para la conducción del agua. Además, el desarrollo de los RES trae aparejado un análisis estructural más profundo que el realizado previamente (Van Bijsterveld y De Bondt, 2002).



Figura 2. Colector asfáltico en Rotterdam (De Bondt, A. y Jansen, R., 2006).

En el Reino Unido, la evolución de estos sistemas ha sido muy pareja a la de los Países Bajos y la tecnología denominada "Interseasonal Heat Transfer" supone el mayor adelanto en este campo. Este sistema utiliza un pavimento asfáltico para captar energía procedente del sol y lo almacena en el terreno, de manera que puede utilizarse en invierno para acondicionar edificios. El sistema funciona también de manera inversa, refrigerando los edificios en verano. Un proyecto de este tipo, implementado en el colegio de primaria Howe Dell (ICAX, 2007), provee de calefacción y refrigeración al edificio durante todo el año.

Además del uso de la energía almacenada para el posterior acondicionamiento de edificios, otra de las ventajas de este tipo de colectores 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.

Todas las referencias anteriormente citadas se basan en el uso de algún tipo de conducto embebido en la matriz del pavimento. Algunos autores (Van Bijsterveld et al. 2001) se han centrado 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 (2002) 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.

Además, 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.

Teniendo en cuenta todos estos antecedentes, el desarrollo del trabajo objeto de esta publicación se estructuró de acuerdo a la siguiente secuencia:

- Verificación experimental de los modelos de captación y cesión de calor.
- Desarrollo y evaluación de sistemas de captación de energía solar térmica y su posterior almacenamiento.
- Diseño y construcción de un prototipo de pavimento captador de energía equipado con sistemas de monitorización y control.

2. Desarrollo de nuevos sistemas de captación y almacenamiento

2.1 Sistema de captación

La primera fase del trabajo de investigación se centró en el estudio del comportamiento térmico de diversas mezclas bituminosas bajo condiciones de irradiación solar similares a las que nos podemos encontrar en España. Dichos estudios de Pascual et al. (2008, 2009 y 2010) tenían como objeto poder modelizar el comportamiento térmico de un pavimento cuando está sometido a irradiación solar y cuando cesa ésta. Entre las variables estudiadas cabe estudiar la influencia del tipo de mezcla asfáltica, la distribución de temperaturas en función de la profundidad o la intensidad de color negro en la superficie.

Junto al análisis térmico de los diseños seleccionados también se efectuó un análisis estructural para verificar la respuesta mecánica de los sistemas de captación de calor a las cargas aplicadas por los vehículos que circulan sobre el pavi-

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos

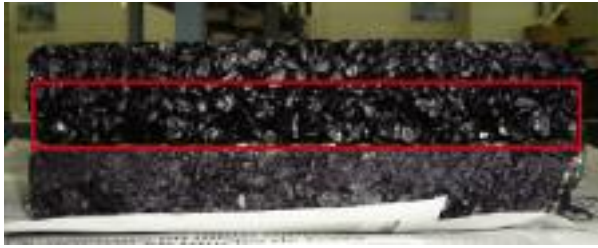


Figura 3. Probeta de pavimento sandwich.

mento. Las conclusiones a este análisis están basadas en los resultados obtenidos en la simulación por ordenador con programas de elementos finitos y la realización de diferentes ensayos de laboratorio.

La conclusión alcanzada fue que el desarrollo de captadores térmicos basados en tubos incrustados dentro del pavimento tenía graves contraindicaciones y que, aun mejorando los diseños existentes, no se vislumbraba una capacidad de mejora destacable. La principal limitación de los sistemas basados en tuberías es la falta de superficie de contacto entre el fluido caloportador y el pavimento, además del inconveniente adicional que supone la colocación de los tubos a una profundidad relativamente grande, que reduce más aún el rendimiento de captación térmico.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, surge la idea de combinar la capacidad de conducción hidráulica de las mezclas porosas junto con otros tipos de mezclas asfálticas. Esta conjunción de propiedades provocó la aparición del concepto de pavimento "sandwich", que 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.
- 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 capaz de soportar el peso de todas las capas que se encuentren por encima de la misma, así como todas las cargas de los vehículos que circulen por el pavimento.

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 y transportada hasta la capa intermedia.

La siguiente fase de la experimentación consistió en la construcción de probetas bajo el concepto de pavimento sándwich. Con dichas probetas se buscaba estudiar, a escala de laboratorio, la capacidad de captación térmica del fluido que circula por la capa drenante. Dichas probetas tienen unas dimensiones de 30 x 40 cm² (Figura 3). En los primeros ensayos se emplearon capas drenantes con un contenido de huecos del 23 y del 27%. La energía irradiada estuvo en el rango 300-450 W/m², dependiendo de la tipología de las probetas y del caudal de agua que circulaba por la capa drenante.



Figura 4. Ensayo termohidráulico.

Los resultados obtenidos para las probetas con un 23% y un 27% de huecos se pueden ver en la Figura 5.

De dichos datos mostrados en la Figura 5, destaca el porcentaje de rendimiento obtenido, llegándose a captar un 80% de la energía irradiada. También se observa que, al aumentar el caudal (aumentando el porcentaje de huecos de la mezcla porosa), mejora sensiblemente el rendimiento térmico de captación.

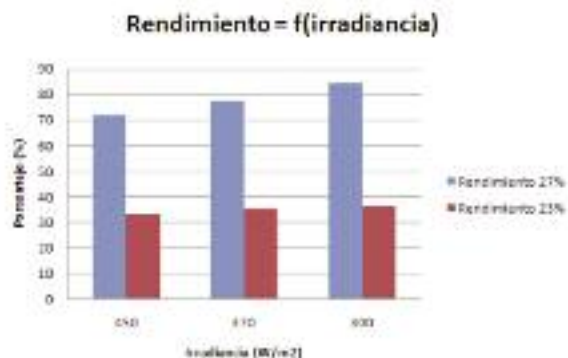


Figura 5. Comparación de los rendimientos de los dos tipos de probetas.

Durante el desarrollo de esta serie de ensayos surgió la necesidad de analizar otras variables que podrían ser críticas en el proceso de escalado. La primera era la posibilidad de incrementar el caudal de agua mediante una ligera presurización (0.06 bar). La segunda era comprobar la linealidad de los caudales en función del camino recorrido.

Para resolver estas cuestiones, se construyeron nuevas probetas en las que, manteniendo el porcentaje de huecos de la mezcla porosa, se duplicó la longitud (30 x 80 cm) y se impermeabilizaron con tela asfáltica para evitar fugas de fluido al presurizar la circulación de agua. Este último experimento no tuvo éxito, ya que aparecieron numerosas fugas de agua. Los resultados de variación de caudales en función del tiempo se muestran en la Figura 6 (probetas sin presurizar).

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

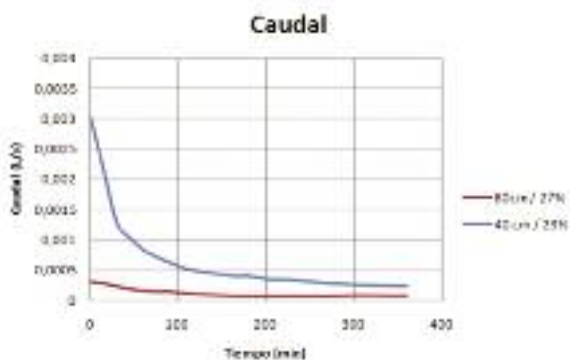


Figura 6. Representación del caudal en las probetas de 40 cm y 23% de huecos y de 80 cm con 27% de huecos.

larga con 27% de huecos se acercan a los obtenidos en los ensayos para la probeta corta con 23% de huecos.

2.2 Sistema de 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 asociado un sistema de almacenamiento para satisfacer las demandas energéticas en el momento que éstas sean requeridas. De este modo, se evitan las fluctuaciones de suministro, 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 almacenamiento.

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 de las siguientes formas (Fernández. 1997):

- 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.

En nuestro caso concreto, se ha estudiado la posibilidad de almacenar calor sensible en la subbase de un firme per-

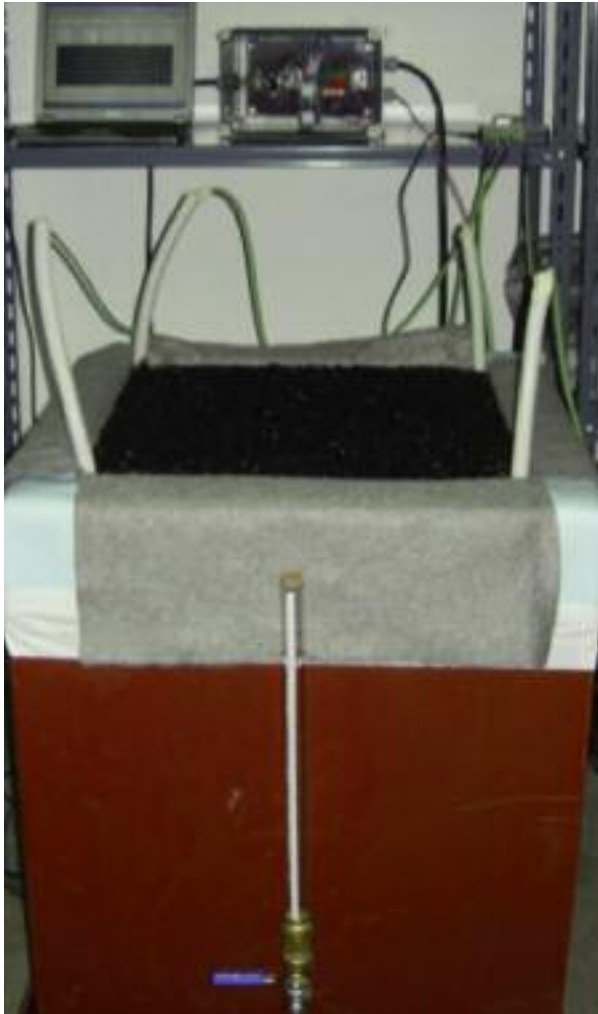


Figura 7. Sistema de almacenamiento de energía térmica de laboratorio.

meable, compuesta por grava y agua. En la fase de ensayos de laboratorio se ha construido un depósito de dimensiones $0,5 \times 0,5 \times 0,68 \text{ m}^3$, de material rígido e impermeable, recubierto con material aislante en todas sus caras, excepto en la superficie.

La primera capa, en la superficie, corresponde a un pavimento permeable, consistente en una mezcla porosa PA12. Las capas sucesivas están formadas por gravilla, un geotextil de separación y zahorra.

Durante los ensayos se aplica calor desde el interior del depósito 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 realizaron medidas de temperatura en diferentes puntos del depósito en función de los flujos de calor aplicados. También se recogieron medidas de nivel de agua en la base del firme po-

roso para obtener datos de pérdidas por evaporación de agua, así como datos sobre temperatura del aire y humedad.

Las temperaturas programadas para los ensayos fueron de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y $50 \text{ }^\circ\text{C}$. El proceso calentamiento se produce hasta conseguir un equilibrio en las temperaturas medidas en las cuatro sondas con las que está equipado el depósito. A continuación se cesa el proceso de calefacción y se registra el proceso de enfriamiento. Las curvas de enfriamiento se registran 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 temperatura alcanzada a la altura de las cuatro sondas durante los periodos de calentamiento y enfriamiento del depósito refleja la poca estratificación producida, es decir, 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.

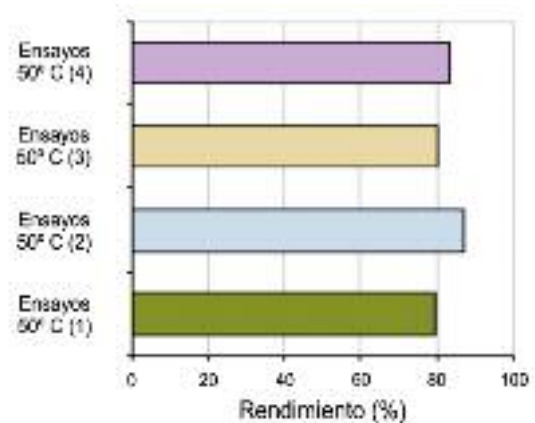


Figura 8. Rendimiento del calor almacenado durante el calentamiento.

2.3 Tramo de ensayo

Una vez analizados los datos recogidos en los estudios de laboratorio, se llegó a la conclusión de que era posible escalar el proceso. La realización del tramo de prueba se basó en un diseño que integra la captación y el almacenamiento. El circuito diseñado consiste en un circuito primario en el que la ener-

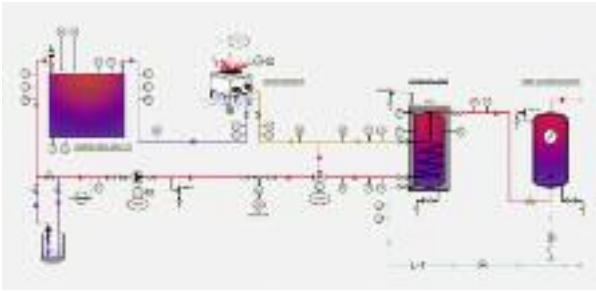


Figura 9. Esquema del sistema de captación-almacenamiento del tramo de prueba.

gía captada por el módulo de captación se envía a un módulo de almacenamiento capaz de ceder la energía al sistema de agua sanitaria de un edificio (Figura 9).

El módulo de captación consiste en una superficie de 6 x 8 m, que recoge la irradiación solar y transmite la energía al fluido caloportador (agua). Este fluido intercambia la energía recibida con el sistema de agua caliente sanitaria 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.

El módulo de captación se subdivide en 4 secciones para estudiar diferentes escenarios de captación de energía a escala real. En la capa drenante de la primera sección se dispone un contenido en huecos del 35%. Esta sección trabaja con una presión de 0,7 bares. Las dos siguientes secciones trabajan sin presión e incluyen capas drenantes con contenidos de huecos del 35 y del 30%, respectivamente. La última sección corresponde a una capa de grava con un 45% de huecos.

Para conseguir un buen funcionamiento del módulo de captación se ha procedido a la impermeabilización de la base del tramo y de la parte superior de las capas drenantes. El módulo de prueba se ha diseñado para que cada sección pueda trabajar con o sin presión e independiente del resto. De esta manera, podemos definir diferentes escenarios de trabajo y comprobar cómo se comporta el sistema en los mismos.

Los resultados obtenidos hasta el momento permiten certificar que es factible extraer energía del aglomerado asfáltico irradiado por el sol. En la actualidad se está monitorizando el tramo de prueba en diferentes condiciones ambientales externas.



Figura 10. Detalle de las cuatro secciones del tramo de prueba.

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 40 cm.
- 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 sistema de captación, 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.
- Es factible el aprovechamiento energético de la radiación solar recibida sobre un pavimento de aglomerado asfáltico.

4. 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

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos

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, Tecnalia, 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.

5. Referencias

- Bilgen, E. y Richard, M.A. (2002). *Horizontal concrete slabs as passive solar collectors*. Solar Energy, 72 (5): 405-413.
- Chaurasia, P. B. L. (2000). *Solar water heaters based on concrete collectors*. Energy, 25 (8), 703-716.
- ICAX. Interseasonal Heat Transfer. (2007). Howe Dell School. Renewable energy for schools. http://www.icax.co.uk/howe_dell_school.html. [Consulta: 31 de Julio de 2009].
- De Bondt, A. y Jansen, R. (2006). *Generation and saving of energy via asphalt pavement surfaces*. Avenhorn (Países Bajos): Ooms Avenhorn Holding .
- Fernández, P. (1997). *Energías Renovables*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.
- 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
- Pascual, P., Vega, A., Rodríguez B, J., Rodríguez H, J. , Castro, D., Serrano, P., Cortes, C., García, C., Álvarez, S., Potti, J.J. " *Pavimentos asfálticos sostenibles*". VIII Congreso Nacional de Firms. Valladolid, 21-23 de Octubre de 2008.
- Pascual, P., Rodríguez, J., Castro, D., Serrano, P.: *Metodología para el estudio del comportamiento térmico de firmes destinados a la captación de energía solar*. XV Congreso Ibero-Latino Americano del Asfalto. Lisboa 23-27 noviembre 2009.
- Pascual, P., Vega, A., Rodríguez, J., Castro, D., Serrano, P., Rodríguez, J., Cortés, C., García, C., Álvarez, S., Peña, J.L. " *Sustainable asphaltic pavements: getting energy from the roads*". IRF 16th World Road Meeting Proceedings". Lisbon 25-28 may 2010. Paper nº 517. p.p.911-918.
- PVGIS, 2007.<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (Último acceso: 1.5.2011)
- Sokolov, M. y Reshef, M. (1992). *Performance simulation of solar collectors made of concrete with embedded conduit lattice*. Solar Energy, 48(6), 403-411.
- Van Bijsterveld, W.T., Houben, L.J.M., Scarpas, A. y Moleenaar, A.A.A. (2001). *Using Pavement as Solar Collector. Effect on pavement temperature and structural response*. Transportation Research Record, 1778(17): 140-148
- Van Bijsterveld, W.T. y De Bondt, A. (2002). *Structural aspects of asphalt pavement heating and cooling systems*. Amsterdam (Países Bajos): Third International Symposium on 3D Finite Element Modeling, Design & Research.
- Wendel, I.L. 1979. *Paving and solar energy system and method*. Estados Unidos, patente de invención número 4.132.074, 1979-01-02.

#14

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Las mezclas asfálticas son 100% reciclables en nuevas mezclas” (EAPA)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE