

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS SOSTENIBLES (PAS)

Autores/Ponente

Pascual Muñoz, Pablo

GITECO. Universidad de Cantabria

Vega Novo, Amaya

GITECO. Universidad de Cantabria

Rodríguez Bayón, Joseba

GITECO. Universidad de Cantabria

Rodríguez Hernández, Jorge

GITECO. Universidad de Cantabria

Castro Fresno, Daniel

GITECO. Universidad de Cantabria

Serrano Bravo, Pedro

Universidad de Cantabria

Cortés de la Fuente, Christian

Servia Canto, S.A.

García Serrada, Carlos

Construcciones Llorente, S.A.

Alvarez García, Sonia

Construcciones Llorente, S.A.

Potti Cuervo, Juan José

Coordinador del Proyecto FENIX

RESUMEN

La línea de investigación en pavimentos asfálticos sostenibles (PAS), perteneciente al proyecto FENIX, pretende hacer frente al reto que supone la aplicación de nuevos conceptos en carreteras más seguras y sostenibles mediante el estudio y desarrollo de la capacidad de los firmes asfálticos para captar y almacenar la energía procedente del sol.

El objetivo de esta comunicación es dar a conocer la metodología de trabajo que se llevará a cabo durante el desarrollo de la investigación. En este documento se presenta el estado del arte de los métodos de captación y almacenamiento de energía en carreteras. Además, se describen los ensayos encaminados a la caracterización de los elementos que componen el sistema PAS: el colector asfáltico captador de energía y su lugar de almacenamiento en la subbase de un firme permeable, medio constituido por agua y árido calizo.

Así, se pretende conseguir que las carreteras, tradicionalmente construidas sin tener en cuenta los aspectos medioambientales, se conviertan en una fuente de energía limpia, eficiente y totalmente renovable, capaz de cubrir parte de las necesidades energéticas actuales en detrimento del consumo de combustibles fósiles.

Palabras Clave: colector asfáltico, almacenamiento de calor, firmes permeables y bomba de calor geotérmica.




ANTECEDENTES Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

La consecución de los objetivos medioambientales de reducción del consumo de combustibles fósiles implica el desarrollo de nuevas formas de aprovechamiento de las energías renovables, y desde el punto de vista de la eficiencia energética, el desarrollo de tecnologías de ahorro de energía. La línea de investigación en pavimentos asfálticos sostenibles (PAS), perteneciente al proyecto FENIX, pretende hacer frente a este reto mediante el desarrollo de un sistema innovador capaz de captar parte de la energía procedente de la irradiación solar a través de un pavimento asfáltico y almacenarla en la subbase de un firme permeable empleado como sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS). Esta energía, totalmente renovable y limpia, permitirá climatizar edificios durante todo el año y evitar la aparición de hielo en las carreteras, entre otras aplicaciones.

El origen de esta técnica se basa en el calentamiento que la superficie de los pavimentos sufre al estar sometida a la radiación solar. Si además se trata de pavimentos de mezcla bituminosa, con su característico color negro, este puede llegar a adquirir temperaturas cercanas a los 70 °C en días de máxima irradiación. Esto, unido a la gran cantidad de asfalto utilizado en las áreas urbanizadas, da idea de la potencialidad de este elemento como fuente de energía. En cualquier caso, el primer paso para aprovechar esta energía es su recolección. De nada sirve la gran cantidad de energía absorbida por el asfalto si no es posible retenerla.





Actualmente ya existen algunos sistemas basados en la idea de utilizar el pavimento para absorber el calor a modo de gran panel termosolar, de almacenar ese calor en un lugar adecuado y de aprovecharlo. Empresas y centros de investigación de países como Japón, Holanda o Gran Bretaña han investigado y desarrollado sistemas de este tipo a lo largo de los últimos años. Sirvan los siguientes antecedentes para demostrarlo, así como para colocar al sistema PAS en el contexto del avance de estas tecnologías.

A finales de los años setenta, en Estados Unidos, una patente con título "Paving and solar energy system" (Wendel, 1979) define ya 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.

En la década de los noventa, el número de instalaciones de bomba de calor geotérmica que permitían fundir el hielo instalado sobre pavimentos (aceras y carreteras) fue aumentando en países como Suiza, Alemania o Japón. Desde 1994, la planta piloto SERSO (figura 1), 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 (figura 2) 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. En otros países como Suecia, la circulación de agua bajo las aceras para evitar su congelación ha sido un sistema utilizado con éxito durante los últimos treinta años.

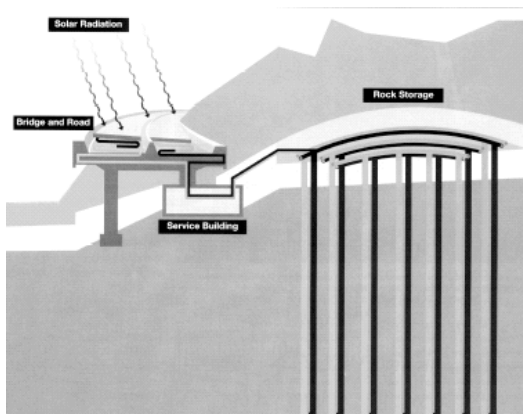


Figura 1. Sistema SERSO (Suiza)

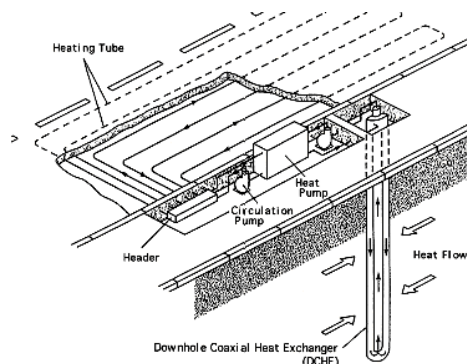



Figura 2. Sistema GAIA (Japón)

Sin embargo, ha sido en Holanda y el Reino Unido donde la investigación y el desarrollo de este tipo de sistemas más ha avanzado. En estos países, el objetivo de los estudios no ha sido sólo el de usar el calor captado y almacenado para evitar problemas de congelación en carreteras. El avance sustancial en este campo ha llegado de la mano de la utilización de dicha energía en la climatización de edificios.

En Holanda 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 la influencia del sistema en la distribución de temperaturas a través del asfalto y el efecto de los tubos y de dicha distribución en su durabilidad. Profundidad de los tubos, distancia entre ellos o caudal del fluido a través de ellos son algunos de los parámetros analizados en el estudio térmico y estructural llevado a cabo a través de ensayos de campo, de laboratorio y de la creación de modelos numéricos.

De este trabajo nacen los colectores asfálticos denominados "Road Energy System (RES)" (figura 3). Este sistema, desarrollado entre los años 1997 y 2001, consiste en una capa asfáltica reforzada mediante una parrilla (grid) y unos tubos para la conducción del agua. En verano, un caudal determinado de agua fría es bombeada desde un acuífero a través de los tubos embebidos en el pavimento; debido a la radiación del sol el agua se calienta, llegando la energía calorífica a otro punto del acuífero, donde se almacena. En invierno el sistema opera en sentido contrario extrayendo calor del acuífero.

Además, el desarrollo de los RES trae aparejado un análisis estructural más profundo que el realizado previamente (Van Bijsterveld y De Bondt, 2002).

Otras empresas holandesas se unieron al desarrollo de estas tecnologías dando como resultado la aparición de dos nuevas metodologías, la "Winnerway", similar a la de los RES pero con

pavimentos de hormigón, y la "Zonneweg", cuya diferencia con los RES estriba en que se utiliza un asfalto poroso a través del cual se hace pasar el agua que ha de llevar el calor captado hacia el lugar del almacenamiento.

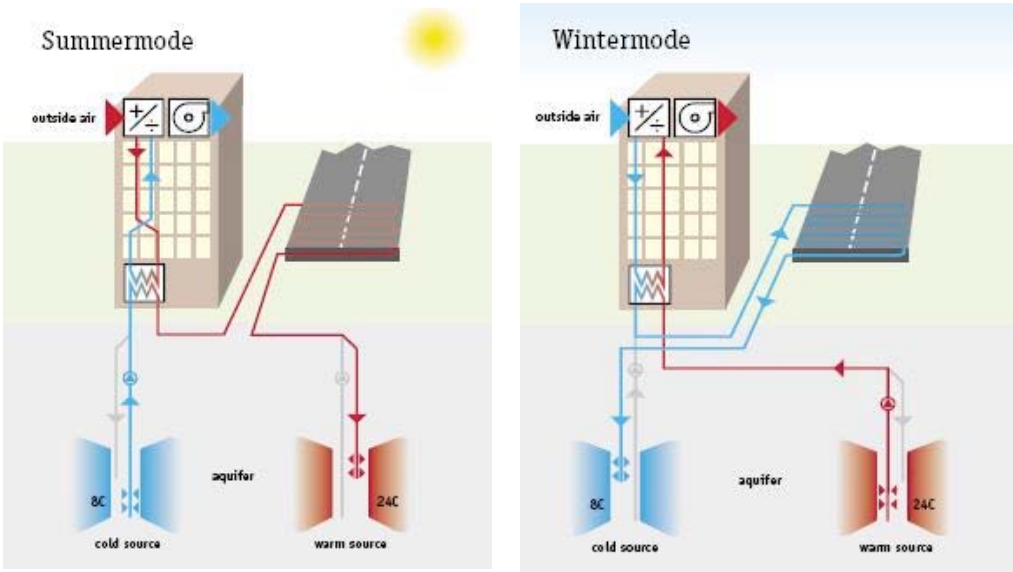


Figura 3. Esquema de funcionamiento en verano (izda.) e invierno (dcha.) del colector asfáltico RES (Fuente: Ooms Avenhorn)

Por su parte, en el Reino Unido, la evolución de estos sistemas ha sido muy pareja a la de Holanda, sobre todo en los últimos años. Por un lado el progreso más importante en este campo ha sido el desarrollo de la tecnología denominada "Interseasonal Heat Transfer". Este sistema es 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. De manera contraria, este sistema puede utilizarse para refrigerar los edificios en verano.

Los dos proyectos que, hasta la fecha, se han llevado a cabo en relación a esta técnica son: la instalación de un sistema para proveer de calefacción y refrigeración al colegio de primaria Howe Dell (figura 4) y el proyecto de carretera de Toddington. En el primer caso, el objetivo se consigue mediante un sistema de captación compuesto por una red de tuberías bajo el asfalto por las que circula agua y un sistema de almacenamiento compuesto por otra red, esta vez enterrada bajo el edificio principal. En el segundo caso, el objetivo es evitar la congelación de la carretera en invierno y la aparición de fisuras en verano. El calor extra puede ser utilizado, además, para la climatización de edificios.



Figura 4. Proceso de colocación de tubos y asfalto captador de calor (Fuente: www.icax.co.uk)

Por otro lado, los trabajos que algunos investigadores como Rajib Mallick, del Instituto Tecnológico de Worcester, o Stephen Coupe y Susanne Charlesworth, de la Universidad de Coventry (Coupe *et al.*, 2008) están llevando a cabo van en el camino de innovar u optimizar los sistemas ya implementados. Cabe destacar el trabajo de la Universidad de Coventry, cuyo objetivo es combinar un sistema urbano de


drenaje sostenible (SUDS) con la tecnología de la bomba de calor geotérmica (figura 5), obteniendo de esta manera una fuente de energía renovable cuyos beneficios se sumen a los conseguidos gracias a la reutilización del agua captada (Coupe y Nnadi, 2007).



Figura 5. Instalación de un sistema de bombas de calor geotérmicas integrado en la subbase de un firme permeable. Hanson EcoHouse (Coupe y Nnadi, 2007).

Además de los estudios y proyectos citados anteriormente, hay que tener en cuenta las investigaciones llevadas a cabo por otros autores que, aunque no tienen como objetivo el desarrollo de este tipo de técnicas, sí ayudan a comprender los fundamentos de la captación de calor en pavimentos.

Así, son numerosas las publicaciones que estudian la respuesta térmica del pavimento al efecto de la radiación solar. Hermansson (2000, 2001 y 2004), Yavuzturk, *et al.* (2005) y Minhoto *et al.* (2005) desarrollan modelos de simulación para el cálculo de la distribución de temperaturas en el pavimento. Estos modelos están basados en el balance



de energía que tiene lugar en la superficie como paso previo a la conducción del calor en el pavimento. Asaeda *et al.* (1996) y Bilgen y Richard (2002), por su parte, también estudian el gradiente de temperaturas originado en el pavimento por el efecto del sol. En este caso el análisis es puramente experimental, con ensayos de laboratorio y de campo sobre probetas de diferentes materiales, como hormigón y mezcla bituminosa.

Respecto al almacenamiento de energía térmica, "Thermal Energy Storage" (TES), el desarrollo de esta tecnología tiene que ver con el almacenamiento temporal de energía térmica a alta o baja temperatura para su uso posterior. 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 almacenamiento.

El almacenamiento de la energía térmica se puede hacer (Duffie y Beckman, 1991):

- 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 **energía química** originada en algunas reacciones químicas reversibles y endotérmicas

Durante la pasada década los TES han sido de interés para un amplio abanico de aplicaciones térmicas, tales como calefacción, agua caliente, refrigeración o sistemas de aire acondicionado (Dincer, 2004). Los sistemas de almacenamiento de calor son variados y responden a las diversas tecnologías desarrolladas en el campo de la energía solar y geotérmica.

La selección de un determinado medio de almacenamiento depende de la naturaleza del proceso, del periodo de almacenamiento requerido (diario o estacional, p.e.), viabilidad económica, condiciones de operación, etc. (Dincer, 2002). Para el calentamiento de agua, resulta lógico el almacenamiento de energía bajo forma de calor sensible; si se usan colectores de calentamiento para acondicionamiento de aire, el almacenamiento puede ser tanto en forma de calor sensible como latente. Mientras que en procesos fotovoltaicos o fotoquímicos, el almacenamiento es en forma de energía química.

El almacenamiento por calor sensible depende del aumento de temperatura del medio de almacenamiento. Por tanto, lo deseable de este medio es que tenga capacidad calorífica alta,



estabilidad frente a los ciclos térmicos, compatibilidad con el material que lo contiene y, bajo coste (Hasnain, 1998).

El agua es un elemento útil, barato y fácilmente disponible para el almacenamiento de calor sensible, en forma de agua caliente sanitaria o agua para calefacción. Su calor específico es más alto que otros materiales; el agua puede almacenar casi cinco veces más energía (4.186 kJ/kg°C) de la que puede almacenar la misma masa de roca o piedra (0.88 kJ/kg°C). Sin embargo, debido a su alta presión de vapor, es preferible su uso para almacenamiento de calor a bajas temperaturas, dentro del rango de 25-90 °C. Por tanto, representa un medio de almacenamiento de calor idóneo para sistemas de baja temperatura desde un punto de vista termodinámico.

Actualmente, los tanques de almacenamiento de agua se fabrican de una gran variedad de materiales, como acero, aluminio, hormigón reforzado y fibra de vidrio. Estos se recubren con materiales aislantes como lana de vidrio, poliuretano y otros. Sus dimensiones comprenden desde los 100 litros en aplicaciones solares para uso doméstico con capacidad de almacenamiento de unas horas, hasta los 12.000 m³ para almacenamiento de calor estacional en aplicaciones solares a gran escala (Fisch *et al*, 1998).

Para aplicaciones de almacenamiento a gran escala se han considerado las formaciones geológicas subterráneas ya que ofrecen un gran potencial de almacenamiento durante largos periodos de tiempo (Forsström, 1987). El almacenamiento de



calor bajo tierra se denomina UTES (Underground Thermal Energy Storage), y normalmente se emplean para almacenar calor y frío durante largos periodos de tiempo, utilizando la capacidad del terreno para extraer o depositar calor debido a que mantiene una temperatura prácticamente constante a lo largo del año a partir de una determinada profundidad.

El uso de otros materiales para el almacenamiento de calor es una aplicación que se está estudiando actualmente (Zalba, B. *et al.* 2003. y Farid, M.M. *et al.* 2004). Dentro de estos sistemas se encuentran las tecnologías de acumulación por calor latente y por energía química. La cantidad de calor necesaria para aumentar un grado la temperatura de un material (calor sensible) es muy inferior a la que hace falta suministrar en el caso del calor latente. Un material de cambio de fase, "Phase Change Material", (PCM) es aquel que experimenta un cambio de estado (sólido ↔ líquido ↔ gaseoso) a una temperatura determinada que es característica de cada material. El interés de este tipo de materiales está en que, durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras que el material va absorbiendo energía. Este hecho supone una mayor densidad energética por parte de estos materiales en comparación con cualquier otro. Actualmente, los PCMs y sus propiedades son motivo de activo estudio. Los más comúnmente usados son ácidos grasos, parafinas, sales y sales hidratadas. Aunque muchas sustancias han sido estudiadas como potenciales PCMs, solamente unas pocas son comerciali-



zadas como tales. Por otro lado, el empleo de esta tecnología se adapta únicamente a aplicaciones de almacenamiento de calor que operen dentro del rango de temperaturas apropiado para el material empleado y durante periodos cortos de tiempo (Dincer, 2004).

En base a algunas de las tecnologías descritas, el presente proyecto pretende desarrollar un medio de almacenamiento de calor en la subbase de los firmes permeables como una combinación de sistemas geotérmicos de poca profundidad a partir del agua de lluvia almacenada en la subbase.

ELEMENTOS Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los elementos que componen el sistema PAS (figura 6) son: el colector asfáltico captador de la energía y la subbase de un pavimento poroso que hace de depósito de almacenamiento y regulación de la energía captada. Será necesaria, además, la conexión del sistema a una bomba de calor, cuya función es potenciar el efecto de la energía almacenada.

El **colector asfáltico** está formado, a su vez, por la mezcla bituminosa que hace las veces de capa de rodadura y la red de tuberías por las que fluye el líquido encargado de transportar el calor desde la superficie asfáltica hacia el lugar donde será almacenado. La **subbase** estará compuesta de agua y grava con un intercambiador de calor situado en el fondo para la extracción y deposición de calor en este medio de almacenamiento. Finalmente, la **bomba de calor** es la responsable de amplificar la energía almacenada proporcio-



nando así calefacción en invierno y refrigeración en verano al edificio o edificios objetivo.

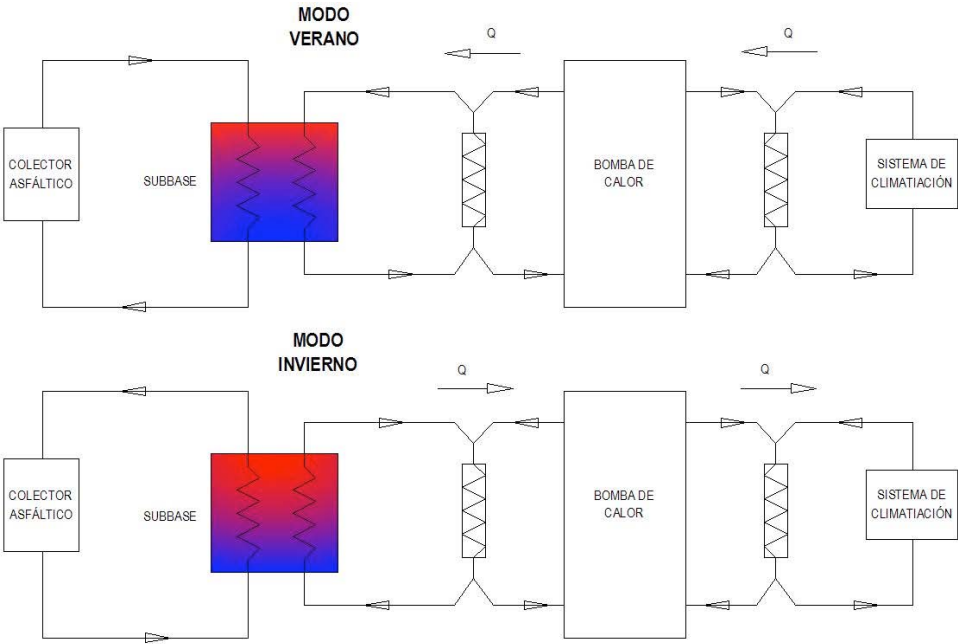



Figura 6. Esquema de funcionamiento del sistema PAS

Al tratarse de un sistema de captación y almacenamiento estacional de la energía, y para una mejor comprensión del mismo, es conveniente describir el sistema en base a la estación del año en la que esté funcionando.

Durante las estaciones de otoño e invierno (figura 7), parte de la energía que se ha acumulado en la subbase del firme se



intercambia con una bomba de calor que potencia su efecto y posibilita la calefacción de un edificio mediante el uso de un sistema de climatización adecuado (suelo radiante o fan-coils). De manera paralela, el resto del calor almacenado durante el verano se intercambia con la superficie del pavimento, evitando el problema de aparición de hielo que las carreteras de algunos lugares sufren en esta época. En este intercambio se consigue almacenar en la subbase del firme la energía frigorífica necesaria para el funcionamiento del sistema en los meses de primavera y verano.

Gracias al uso de las electroválvulas y de las características de la bomba de calor, la misma instalación se utilizará durante las estaciones de primavera y verano (figura 8). Así, la energía frigorífica almacenada durante el invierno sirve ahora para refrigerar el edificio, manteniendo una agradable temperatura en su interior. A su vez, el PAS ha de obtener el calor necesario para su óptimo funcionamiento en los meses fríos. Esto lo consigue mediante su captación por parte del colector asfáltico, cuya red de tuberías se dispone a pocos centímetros de la superficie del pavimento. Gracias a la acumulación de la energía captada, se evita el calentamiento extremo de la capa de rodadura.

Si se dispone de un aparcamiento de superficie, el colector asfáltico se situará en las vías de acceso, al ser esta la superficie que recibe mayor radiación, y las subbases almacén bajo las plazas de aparcamiento. Por tanto, las plazas de aparcamiento serán firmes permeables con superficie de asfalto poroso.

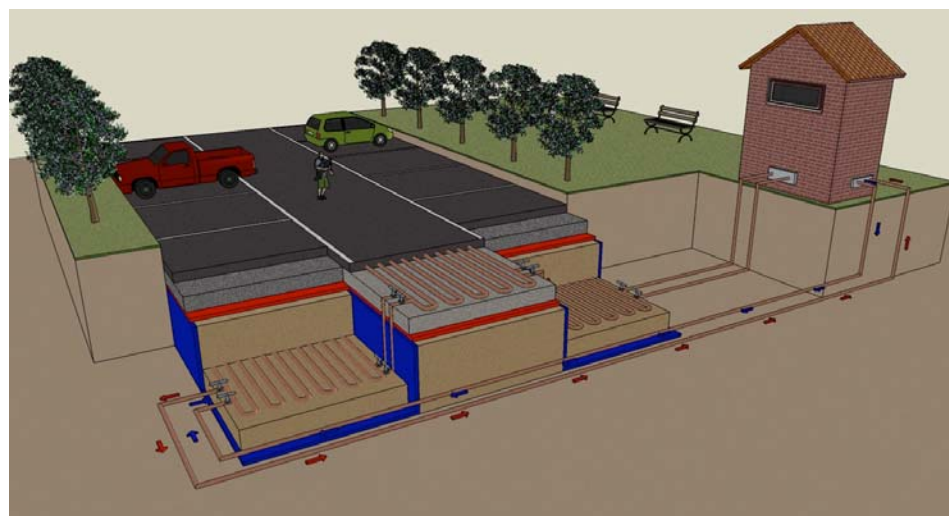


Figura 7. Funcionamiento del PAS durante los meses de otoño e invierno



Figura 8. Funcionamiento del PAS durante los meses de primavera y verano

Las mezclas porosas se desarrollaron inicialmente con el objeto de reducir el agua de escorrentía superficial y la formación de láminas de agua en la capa de rodadura gracias a la permeabilidad que le confieren los huecos, permitiendo el paso del agua hacia las capas inferiores del firme (figura 9). La infiltración del agua entre los huecos del firme permite la transición del agua hasta la zona de la subbase del firme y

proporciona el soporte para que se produzcan los procesos de depuración del agua de lluvia mediante retención física y biodegradación de los contaminantes (Scholz y Grabowiecki, 2007).

La subbase representa, por tanto, un medio de almacenamiento temporal de agua bajo la superficie, o durante periodos de tiempo más largos mediante el empleo de depósitos modulares; además de un sistema de control del exceso de agua de escorrentía producida en las tormentas. La infiltración del agua al subsuelo se evita, si es necesario, mediante el empleo de una geomembrana impermeable (Coupe et al. 2006).

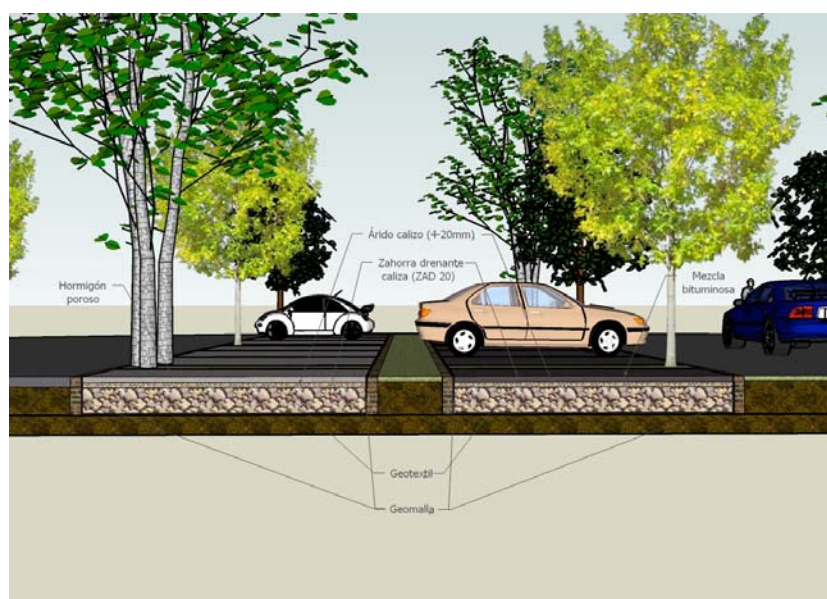


Figura 9. Sección de un firme permeable

Si se evitan las pérdidas de agua por evaporación, el calor absorbido por el pavimento se almacena en este medio. Esto unido a la capacidad de aislamiento del pavimento como un

medio poroso no saturado (asumiendo un determinado porcentaje de humedad adquirido por capilaridad y exposición al ambiente), hacen de la subbase saturada de agua un posible medio de almacenamiento de calor.

Ventajas, desventajas y aplicaciones del PAS

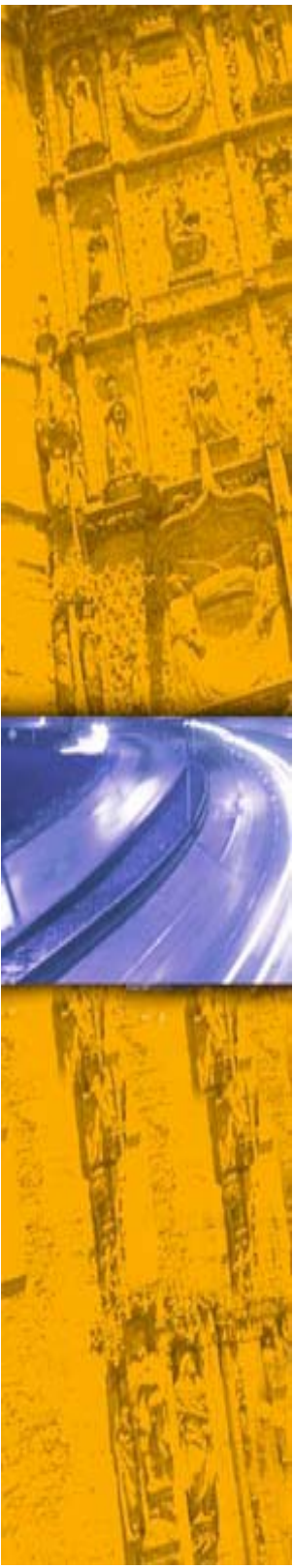
Las ventajas aparejadas al uso del sistema PAS son las siguientes:

- Descenso del consumo de combustibles fósiles.
- Descenso de las emisiones de gases a la atmósfera.
- Atenuación del efecto del fenómeno "Isla de calor urbana".
- Respecto a otros sistemas geotérmicos, en el PAS no se alteran las condiciones térmicas del terreno.
- Depuración de las aguas de lluvia infiltradas en el firme permeable.

Entre las desventajas del sistema se encuentran principalmente:

- Limitaciones estructurales en el diseño del sistema PAS asociadas a las cargas provocadas por el paso de vehículos sobre el colector asfáltico.
- Difícil reparación de los posibles defectos aparecidos en el pavimento durante su vida útil.
- Necesidad de un buen sellado de la geomembrana.





Finalmente, las aplicaciones más importantes de la tecnología PAS son:

- Climatización de edificios a lo largo de todo el año.
- Mayor durabilidad del pavimento gracias al descenso de las temperaturas extremas al que se ve sometido durante el invierno (aparición de hielo) y el verano.
- Apoyo a otros procesos de generación de energía, como sistema de refrigeración o precalentamiento de los fluidos inmersos en dichos procesos.
- Reutilización del agua almacenada para el consumo humano con fines no potables.

OBJETIVOS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Las partes y objetivos que completan el estudio experimental necesario para el desarrollo del PAS son las siguientes:

Parte A. Estudio del colector asfáltico.

1. Caracterización térmica de las mezclas bituminosas que conforman el colector asfáltico. Influencia del desgaste y de los aditivos.
2. Análisis de los parámetros que optimizan el transporte de calor que se produce en el colector asfáltico.
3. Estudio térmico estructural del colector asfáltico. Análisis de los rendimientos conseguidos y de la durabilidad del sistema.

Parte B. Estudio de la subbase almacenadora y reguladora.

4. Estudio del comportamiento térmico de los firmes permeables con el fin de determinar la capacidad de almacenamiento de calor en la subbase como un medio constituido por agua y grava.
5. Desarrollo de un modelo que permita predecir las posibilidades de almacenamiento de calor en la subbase de los firmes permeables.
6. Elaboración de un sistema conjunto de captación de energía solar en mezclas asfálticas y su almacenamiento en la subbase de firmes permeables.

METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Estudio del colector asfáltico.

En lo que respecta al estudio del colector asfáltico, en estos momentos se está desarrollando la primera etapa de la investigación. El objetivo fundamental es entrar en el estudio, más concreto, del material encargado de absorber la energía del sol: la mezcla bituminosa. Se trata con este estudio de caracterizar térmicamente las mezclas asfálticas convencionales (figura 10), analizando su reacción al efecto energético del sol. En base a esta caracterización, y teniendo en cuenta sus propiedades estructurales, podrá elegirse más adelante el tipo más apropiado de mezcla para el diseño óptimo del sistema PAS.





Se obtendrán los parámetros térmicos básicos que caracterizan todos los materiales y que, en el caso de las mezclas bituminosas, no sólo serán necesarios para el análisis de su capacidad de captación, sino que completarán la escasa información existente en este campo. Se obtendrán parámetros tan importantes desde este punto de vista como la absorptividad y emisividad de la superficie del material, su conductividad y calor específico o las temperaturas alcanzadas por el asfalto a diferentes profundidades. En un análisis posterior habrán de tenerse en cuenta las diferentes características de las mezclas ensayadas (densidad, tamaño máximo de árido, porcentaje de ligante, tipo de betún, tipo de árido, relación filler-betún, etc), además de otras relativas a su geometría, como el espesor de la muestra, con la intención de determinar su influencia en el comportamiento de cada tipo de mezcla frente a las sollicitaciones térmicas. Además, se estudiará la influencia del desgaste de la superficie del material en la captación de calor y el uso de aditivos para la mejora de sus propiedades serán objetivos secundarios.

CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE (NORMATIVA EUROPEA EN-13108)		
DENOMINACIÓN NORMATIVA EUROPEA	CORRESPONDENCIA EN ESPAÑA	TIPO DE MEZCLAS
Asphalt Concrete (EN 13108-1)	Hormigón bituminoso (Mezclas convencionales)	D - S - G - Alto Modulo
Asphalt Concrete for very thin layers (EN 13108-2)	Mezclas bituminosas discontinuas para capa delgada	M - F
Soft Asphalt (EN 13108-3)		
Hot Rolled Asphalt (EN 13108-4)		
Stone Mastic Asphalt (EN 13108-5)		
Mastic Asphalt (EN 13108-6)		
Porous Asphalt (EN 13108-7)	Mezclas drenantes	PA

Figura 10. Catálogo de mezclas bituminosas utilizadas en los experimentos

En esta primera etapa, las mezclas bituminosas estudiadas son sometidas a la solicitud térmica de una lámpara de irradiación que simula el efecto del sol. Para este ensayo se introducen sucesivamente bajo la lámpara un número determinado de probetas de cada tipo y, mediante unos sensores de radiación (piranómetros y pirgeómetros) y temperatura, se realizan las siguientes mediciones:

- Irradiancia (W/m^2) de la lámpara sobre la superficie de la probeta.
- Radiación de onda corta (W/m^2) reflejada por la probeta.
- Radiación de onda larga (W/m^2) emitida por la probeta.
- Variación de la temperatura de la probeta con la profundidad.

Con los datos obtenidos se determina por completo el balance de radiación en la superficie del asfalto, así como la distribución de temperaturas a lo largo de su espesor. Paralelamente, se fabricará un determinado número de probetas de cada tipo de mezcla para la medida en un calorímetro de sus **conductividades** y **calores específicos**.

A partir de todas estas mediciones, y con la ayuda de otras como la temperatura ambiente del laboratorio y la de sus paredes, se determinan los parámetros o propiedades térmicas requeridas. Así, con los valores de la radiación incidente sobre la probeta y los de la radiación reflejada por



ella, se obtienen los valores de la **absortividad** asociados a cada tipo de mezcla, mientras que con los valores de la radiación emitida por la superficie de la probeta se determinan sus **emisividades**. Finalmente, con la conductividad, el calor específico y la densidad de cada mezcla se calcula su **difusividad**.

En la figura 11 se muestra el esquema de las diferentes etapas o pasos del ensayo conducentes a la obtención de estos parámetros.

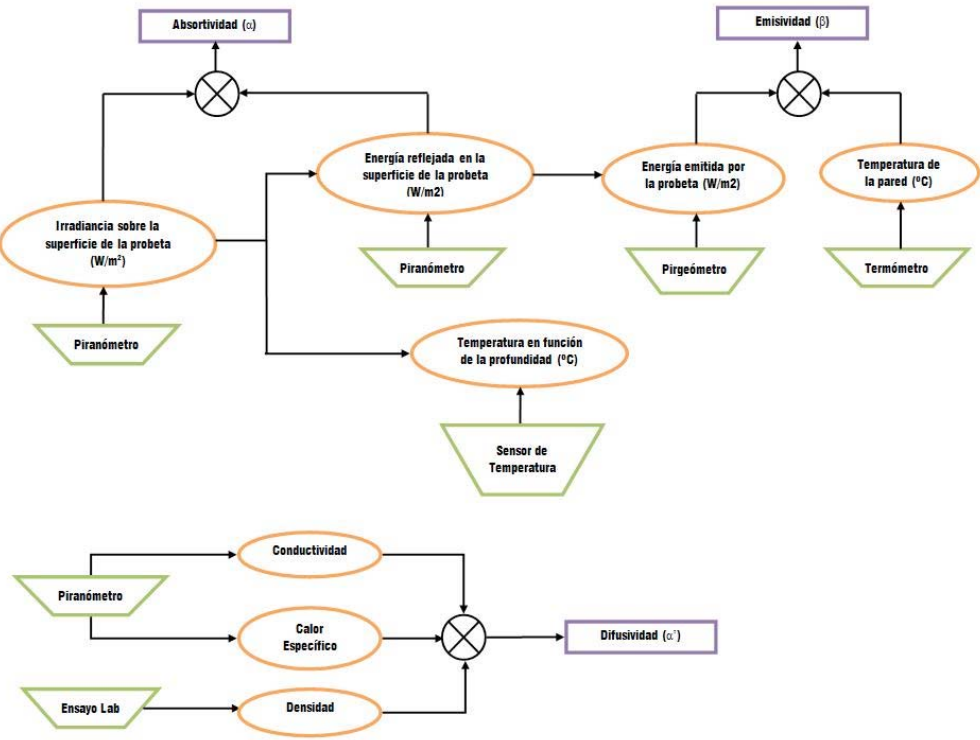


Figura 11. Esquema de la primera etapa de la metodología de ensayos

Resumiendo, una vez acabado el ensayo se dispondrá para cada mezcla ensayada de una hoja de características térmicas de las mismas. Será esta la principal herramienta para el



análisis del comportamiento térmico de las diferentes mezclas bituminosas, y para el estudio de su utilización como elemento captador y transportador de la energía procedente del sol.

Estudio de la subbase de almacenamiento y regulación.

Mediante la superposición de las capas que constituyen un firme permeable con superficie de asfalto poroso, contenido en una estructura aislada térmicamente del exterior excepto en la superficie, se realizarán ensayos de respuesta térmica ante la exposición a radiación solar simulada en el laboratorio. De este modo, se evaluarán diferentes ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento desde su superficie. El objetivo buscado mediante los ensayos de comportamiento térmico consiste en determinar la temperatura a distintas profundidades del firme conteniendo agua en la subbase, ante las condiciones atmosféricas de insolación, fenómenos de precipitación y temperatura ambiente.

Asimismo, se efectuarán ensayos a distintas temperaturas mediante calentamiento desde la subbase, simulando la introducción de un intercambiador de calor. Con la realización de estos ensayos se pretende estudiar la capacidad de almacenamiento de la subbase de un firme permeable en función del aumento de la temperatura del agua contenida en la misma y de la capacidad aislante que le confiere la superficie porosa (pavimento de mezcla drenante).



Por último, se realizará un estudio de la calidad del agua almacenada en la subbase en función de las fluctuaciones de temperatura establecidas y del tiempo de almacenamiento.



CONCLUSIONES

Del análisis de las experiencias previas y del diseño de ensayos se puede concluir que es posible:

- Elaborar un diseño capaz de unir las tecnologías de captación y almacenamiento de calor en firmes, utilizando un pavimento asfáltico como colector solar y la subbase de un firme permeable como medio de almacenamiento de esa energía.
- Desarrollar una metodología de ensayos capaz de analizar y optimizar el diseño de estos sistemas implementando las herramientas de simulación necesarias para facilitar ese análisis.
- Optimizar el sistema al definir rigurosamente el mejor tipo de mezcla bituminosa desde el punto de vista térmico y estructural.
- Obtener la mejor configuración posible del elemento encargado de transmitir el calor absorbido por la superficie del colector asfáltico.
- Determinar los factores de aplicación técnica relevantes, como son el tiempo de almacenamiento, el volumen de agua necesario y la viabilidad económica, entre otros. Es decir, todos aquellos aspectos concernientes a la viabilidad de un almacenamiento de energía en la subbase de un firme permeable.



AGRADECIMIENTOS

La realización del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es) es 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, Serviá 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.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asaeda, T., Thanh Ca, V. y Wake, A. (1996). Heat Storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 30(3): 413-427.

Bilgen, E. y richard, M.A. (2002). Horizontal concrete slabs as passive solar collectors. *Solar Energy*, 72(5): 405-413.

Coupe, S.J. *et al.* (2006). Permeable pavements for water recycling and reuse: initial results and future prospects. 8th International Conference on Concrete Block Paving. San Francisco, California.

Coupe, S.J. *et al.* (2006). Permeable pavements for water recycling and reuse: initial results and future prospects. 8th International Conference on Concrete Block Paving. San Francisco, California.

Coupe, S.J. y O Nnadi E. (2007). Water recycling and ground source heat pump systems within permeable paving-system installation and on-site construction considerations. *Proceedings of the SUDSnet National Conference 2007*. Coventry University TechnoCentre. U.K.

Coupe, S.J., Charlesworth, S y Faraj, A.S. (2008). Combining Sustainable Drainage Infrastructure with Renewable Energy Devices: Feasibility, performance and compliance with the



Code for Sustainable Homes. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, Uk.

Dincer, I. (2002). Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation. International journal of energy research 26:567-588.

Dincer, I. (2004). Thermal Energy Storage. Encyclopedia of Energy. Elsevier. Vol 6.

Duffie J.A., Beckman W.A. (1991). Solar engineering of thermal processes. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons

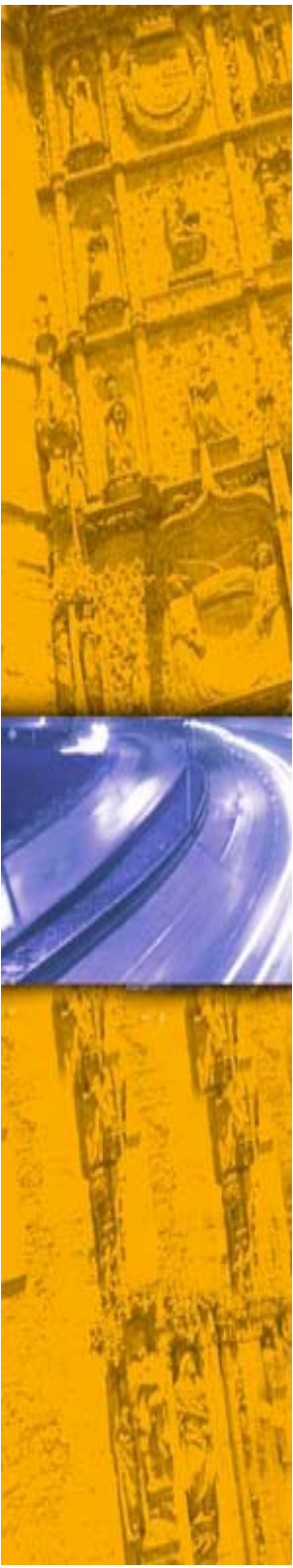
Hasnain, S.M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage material and techniques. Energy Conversion and Management 39 (11): 1127-1138.

Farid, M.M. *et al.* (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management 45: 1597-1615.

Fisch M.N.; Guigas M. y Dalenbäck J.O. (1998). A review of large-scale solar heating systems in Europe. Solar Energy 63 (6): 355-366.

Forsström J.P., Lund P.D. y Routti J.T. (1987). Economic analysis of heat storage in energy systems. Energy research 11: 85-94.





Hasnain, S.M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage material and techniques. *Energy Conversion and Management* 39 (11): 1127-1138.

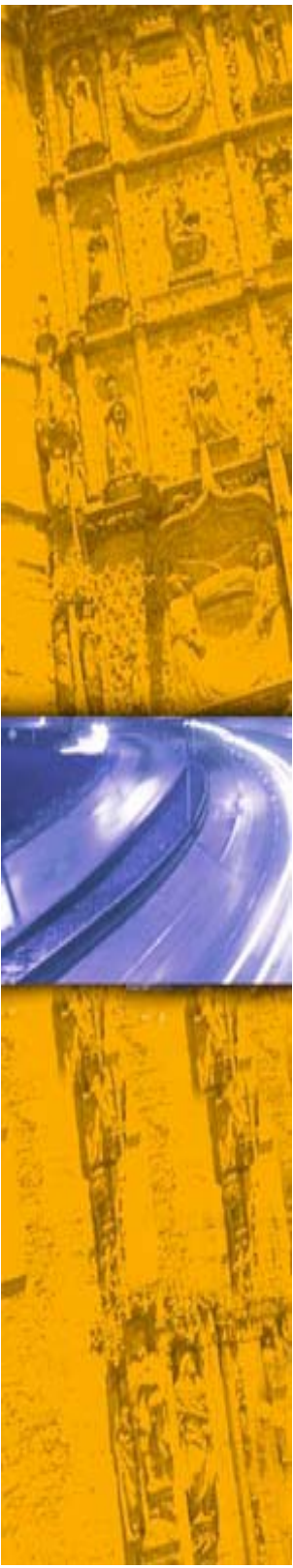
Hermansson, Ake. (2000). Simulation model for the calculation of pavement temperatures, including the maximum temperature. *Transportation Research Record*, 1764(19): 180-188.

Hermansson, Ake. (2001). Mathematical model for calculation of pavement temperatures: comparison of calculated and measured temperatures. *Transportation Research Record*, 1764(19): 180-188.

Hermansson, Ake. (2004). Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures. *Cold regions science and technology*, 40(1-2): 1-17.

Incropera, F.P. y De Witt, D.P. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*. EE.UU.: John Wiley & Sons, Inc. 981 pp. ISBN 0-471-38650-2.

Minhoto, M.J., Pais, J.C., Pereira, P.A.A. y Picado-Santos, L.G. (2005). Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method. *Transportation Research Record*, 1919(11): 96-110.



Scholz, M. y Grabowiecki P. 2007. Review of permeable pavement systems. *Building and environment* 42: 3830-3836.

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.

Van Bijsterveld, W.T. y De Bondt, A. (2002). Structural aspects os asphalt pavement heating and cooling systems. Amsterdam (Holanda): 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.

Yavuzturk, C., Ksaibati, K. y Chiasson, A.D. (2005). Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional, transient finite-difference approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4): 465-475.

Zalba, B. *et al.* (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* 23: 251-283.