

Innovaciones y avances en el ámbito de los pavimentos urbanos para *smart cities*

Rubén-Daniel López-Carreño. *Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña.*

Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro. *Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña. Smart Engineering, S.L.*

Pablo Pujadas Álvarez. *Smart Engineering, S.L.*

Antonio Aguado. *Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña. Smart Engineering, S.L.*

Los pavimentos pueden representar más de la mitad de la superficie del espacio público de las ciudades, por lo que su preservación y mantenimiento requieren de una gestión adecuada. Debido a que éstos tienen influencia sobre la calidad de vida de los ciudadanos, también pueden considerarse una gran fuente de oportunidades para la transformación de las ciudades. El uso de hormigones con propiedades mejoradas en la pavimentación de las ciudades puede añadir nuevas funcionalidades a los firmes, las cuales tienen aplicación evidente en las smart cities.

En este trabajo se muestra una visión global sobre la gestión de los pavimentos urbanos, mostrando algunas de las tendencias más actuales para su reparación mediante el uso de hormigón. El trabajo se ha estructurado en tres bloques. En el primero de ellos se presentan el uso de índices de estado de pavimentos como estrategia de mantenimiento y los refuerzos de tipo whitetopping como una solución constructiva óptima para el refuerzo y la rehabilitación de firmes. En el segundo bloque se describe la contribución de los firmes rígidos en la mitigación de los efectos de las islas de calor en las ciudades y cómo plantear su diseño para optimizar la absorción, almacenamiento e irradiación de calor. Finalmente, en el último bloque se presentan algunas de las últimas innovaciones en el ámbito de los hormigones para pavimentos de smart cities. Estas mejoras significativas en las prestaciones y estrategias de mantenimiento de los pavimentos podrían situar a las empresas que aportan estas tecnologías en el papel protagonista que actualmente ejercen las empresas de construcción, lo que podría derivar en un cambio de paradigma en el sector.

1. Introducción

La importancia de las áreas urbanas en el crecimiento económico y el bienestar social de la población les confiere un lugar central en la discusión de nuevos paradigmas de desarrollo. La sostenibilidad urbana es sugerida recurrentemente a nivel nacional e internacional como el mejor enfoque para orientar el crecimiento actual y futuro de las áreas urbanas.

Una de las prioridades de las ciudades es asegurar la gestión eficaz del territorio y los servicios que afectan al entorno inmediato de las personas que viven y trabajan en ellas. En este sentido, los pavimentos urbanos constituyen un pilar importante de la vida cotidiana y un patrimonio común básico de todos los residentes, ya que habilitan y condicionan la movilidad urbana y el uso del espacio.

A su vez, los pavimentos urbanos suponen una parte importante del área construida de las ciudades. A modo de ejemplo, en Barcelona los pavimentos

representan más del 18% del área metropolitana total y casi 2/3 del espacio público. Esto indica que los pavimentos son un factor clave para el buen funcionamiento del territorio ya que por funcionalidad y extensión afectan directa y constantemente a la calidad de vida de los ciudadanos.

Los pavimentos pueden observarse como una gran fuente de oportunidades para mejorar y transformar las ciudades. Gracias a ellos es posible imaginar un espacio público de convivencia donde se utilicen soluciones durables, compro-

medidas con la economía circular y la sostenibilidad y que además sean capaces de afrontar retos como la reducción de la vulnerabilidad de la ciudad ante los efectos de las islas de calor o la mejora de su capacidad drenante.

En este sentido, el gran atractivo de los pavimentos de hormigón es que poseen una vida de servicio superior a la de las mezclas bituminosas aún con un mantenimiento prácticamente nulo. Además, en los firmes rígidos no suelen aparecer problemas de deformación superficial asociados al paso de ejes pesados y a las zonas de arrancada y frenada, como ocurre frecuentemente en las mezclas de tipo bituminoso.

En contrapartida, a los pavimentos de hormigón tradicionalmente se les ha achacado otros inconvenientes como, por ejemplo, la delicada puesta en obra o la contaminación acústica por el paso de vehículos. Con el objetivo de minimizar dichos inconvenientes, en las últimas décadas los investigadores han realizado importantes esfuerzos en desarrollar nuevos e innovadores hormigones con propiedades mejoradas. De esta manera y sin perjudicar al buen comportamiento mecánico propio del hormigón, se proporcionan nuevas funcionalidades que aportan un valor añadido a los pavimentos rígidos.

El objetivo de este artículo es aportar una visión global acerca de la gestión de los pavimentos urbanos y mostrar algunas de las tendencias actuales para su reparación mediante el empleo de hormigón. Para ello, inicialmente se exponen algunas estrategias para la evaluación del estado de los pavimentos y se presentan los refuerzos de tipo whitetopping como una solución constructiva óptima. Seguidamente se explica cómo los pavimentos de hormigón pueden ayudar a reducir los efectos de las islas de calor en las ciudades y, por último, se enumeran algunas de las últimas innovaciones en el campo de los hormigones y que tienen una clara aplicación en las *smart cities*.

2. Estrategias de mantenimiento y rehabilitación

2.1 Índice de estado de pavimentos como herramienta de gestión y smart-governance

La evaluación del estado de los pavimentos urbanos es una de las componentes más importantes dentro de los sistemas de gestión urbana y una tarea imprescindible en la llamada *smart governance*. Una estimación precisa del estado de los pavimentos asegura una predicción, planificación y optimización exitosa de su conservación y rehabilitación.

Existen muchos y diferentes índices para la evaluación de la condición del pavimento -Pavement Condition Index (PCI), Present Serviceability Index (PSI), VIZIR, etc., (en Baladi *et al.* (1992) puede encontrarse una descripción profunda de cada uno de ellos)- la mayoría de los cuales se desarrollaron para pavimentos interurbanos, por lo que su aplicación a las redes urbanas es compleja y no representativa de la realidad. Además, estos enfoques convencionales son muy costosos, consumen mucho tiempo y son tediosos, además de subjetivos y con un alto grado de variabilidad en los resultados, por lo que son incapaces de proporcionar información cualitativa significativa y casi siempre conducen a inconsistencias en las evaluaciones. Es por esta razón que existe la necesidad de desarrollar un índice de condición general para los pavimentos urbanos capaz de representar el conjunto de problemáticas más relevantes y que pueda aplicarse en el análisis de redes (Osorio *et al.*, 2014).

El Ayuntamiento de Barcelona, conjuntamente con la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC-BarcelonaTech) y la empresa Smart Engineering, ha desarrollado un nuevo método para la evaluación del índice de estado de pavimentos urbanos a través de un enfoque basado en un marco de análisis multicriterio MIVES. La metodología MIVES combina la toma de decisiones multicriterio (MCDM) y la teoría de la utilidad de múltiples atributos

(MAUT), incorporando el concepto de función de valor (VF) y asignando pesos usando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). El enfoque sencillo y directo desarrollado permite una clasificación precisa, consistente y reproducible del pavimento urbano (Pujadas *et al.*, 2017).

2.2 Rehabilitación de pavimentos urbanos a través de los whitetoppings

La reducción de costes de mantenimiento los pavimentos es un objetivo de interés común para el conjunto de la población. Una forma de alcanzar ese objetivo es mediante el empleo de técnicas más económicas y/o durables que las que se utilizan comúnmente en la actualidad. Mientras que los pavimentos asfálticos requieren tareas de restauración cada 5 años aproximadamente, los firmes rígidos tienen una vida útil superior a los 20 años. Esta mayor durabilidad del hormigón puede aprovecharse para la reparación de firmes flexibles mediante la técnica del whitetopping, la cual consiste en la colocación de una capa superior de hormigón sobre la carpeta asfáltica a reparar (Figura 1.a).

Aunque el origen de los *whitetopping* no es nuevo y se tiene constancia de su uso en el año 1918 en los Estados Unidos (Hutchinson, 1982), su aplicación no ha sido muy extendida a lo largo del siglo XX. Prueba de ello es que, hasta el año 1992, apenas se habían construido unas 200 experiencias en los Estados Unidos, país donde más *whitetoppings* se han construido (McGhee, 1994). Sin embargo, desde la mitad de los años 90 este tipo de soluciones está ganando terreno para la reparación de firmes de aglomerado asfáltico (Rasmussen, 2004).

Los whitetoppings proporcionan mayor durabilidad a los firmes reparados, así como otras ventajas propias de los pavimentos de hormigón que son de especial interés en el ámbito urbano. A modo ilustrativo pueden enumerarse algunas de estas ventajas, como por ejemplo que ayuda a mitigar las islas de calor, aminora los costes de iluminación de las calles, acorta las distancias de frenado (especialmente en mojado), reduce el consumo de combustible de los vehículos pesados y las consecuentes emisiones de gases tóxicos, etc.



Figura 4. Modelización del comportamiento de un mortero con PCMs utilizado en cerramientos de fachada.

Las propiedades de los *whitetoppings* pueden ser adaptadas a las necesidades del firme en función del tipo de hormigón utilizado en la capa superior de refuerzo. La aplicación de hormigones de prestaciones especiales como los autocompactantes, de retracción compensada, con fibras, etc., abre un abanico de nuevas posibilidades para la reparación de pavimentos urbanos que pueden satisfacer las demandas actuales.

Hormigones autocompactantes

Los hormigones autocompactantes tienen la propiedad de fluir por la acción de su propio peso (Figura 1.b) de forma que se adaptan fácilmente a cualquier geometría. Su capacidad autocompactante le permite penetrar en los poros superficiales del asfalto, mejorando potencialmente el comportamiento mecánico de la interfaz (López-Carreño *et al.*, 2017). Su fácil y rápida puesta en obra, sin necesidad de vibrado, permite acortar el plazo de ejecución y aliviar la contaminación acústica durante la construcción, reduciendo así el impacto sobre los vecinos. El acabado superficial acostumbra a ser liso, por lo que puede ser un material óptimo para zonas donde se requiera una buena nivelación, como en el caso de los carriles bici. Por otro lado, al tratarse de hormigones que en general tienen una baja permeabilidad, el riesgo de carbonatación derivada de la penetración en el interior del hormigón del CO₂ emitido por el tráfico rodado es pequeño.

Hormigones expansivos

Los hormigones expansivos con retracción compensada permiten eliminar o minimizar la fisuración debida a la retracción por secado (Oliveira *et al.*, 2014). Incorporando cementos o aditivos expansivos en la dosificación se puede controlar la variación de volumen durante el proceso de hidratación. Estos hormigones pueden ser eficientes en la construcción de pavimentos, ya que permiten aumentar el tamaño de las losas gracias a la reducción del número de juntas necesarias, disminuyendo así también el coste y plazo de ejecución. Además, la expansión del material puede hacer que las losas estén comprimidas, por lo que se reducen las deformaciones debidas a las variaciones de temperatura y humedad ambientales y se mantiene una adecuada regularidad superficial.

Hormigones reforzados con fibras

Los hormigones reforzados con fibras, ya sean plásticas o de acero, aportan una serie de ventajas de especial interés para la construcción de firmes urbanos. La adición de fibras reduce el riesgo de aparición de fisuras por efecto de la retracción, por lo que también se pueden construir losas de mayor tamaño y, por lo tanto, reducir el número de juntas. Por otro lado, la presencia de fibras en el hormigón mejora su comportamiento a fatiga y la tenacidad del material (Pujadas, 2013 y Blanco, 2013), permitiendo así la construcción de *whitetoppings* de menor espesor.

Hormigones de alta resistencia

Otros hormigones de especial interés son los de alta resistencia, ya que con ellos se pueden construir *whitetoppings* de espesores reducidos. Gracias a ello se pueden construir pavimentos en firmes donde la rasante esté condicionada por restricciones de gálibo (túneles o pasos inferiores) o por la presencia de aceras, imbornales, pozos de registro, etc. Además, existen estudios que sugieren que el uso de este tipo de hormigones puede reducir los costes económicos de mantenimiento a largo plazo (Schmidt y Schmidt, 2012).

Hormigones con áridos reciclados y con escorias siderúrgicas

En los hormigones con áridos reciclados se sustituyen total o parcialmente los áridos por fracciones procedentes de la demolición de estructuras o de rechazos de la industria del prefabricado que no han superado el control de calidad. Este tipo de hormigón es utilizado frecuentemente en la fabricación de adoquines, pero no así en la construcción de losas de pavimento de hormigón. Sin embargo, estudios desarrollados en la UPC (Mena, 2015) han demostrado posible obtener un hormigón de funcionalidad estructural con árido 100% reciclado añadiendo fibras de acero a la dosificación (Figura 2). Por lo tanto, resulta estructuralmente viable construir firmes de hormigón con árido reciclado, de forma que se revaloriza este tipo de material residual.



Figura 2. Representación de un hormigón autocompactante con árido reciclado y fibras. (Mena, 2015).

Por otro lado, otro subproducto procedente de fundiciones y que puede ser potencialmente revalorizado para la construcción de pavimentos son las escorias de altos hornos (González Ortega, 2015). Aunque es un material que suele ser inestable durante la hidratación y que acostumbra a dar problemas de expansión, ésta podría ser controlada si se limitase su tamaño máximo mediante tamizado. Ello sería posible a que las partículas de menor tamaño se hidratan de forma más rápida y alcanzan niveles de hidratación más elevados que las partículas más gruesas. Por lo tanto, la adición de escorias de altos hornos de granulometría fina en la dosificación del hormigón puede constituir una potencial aplicación funcional para este subproducto.

Técnicas de adherencia para whitetoppings

En los whitetoppings, la adherencia entre el hormigón de refuerzo y la capa de soporte proporciona un comportamiento resistente monolítico. De esta forma y bajo la aplicación de una carga exterior, los esfuerzos que aparecen en el pavimento son de menor magnitud que aquellos que aparecerían en ausencia de adherencia (Figura 3). Ello revierte en la posibilidad de reducir el espesor del refuerzo para resistir las mismas cargas de tráfico, lo que se traduce en ahorro de material y costes a la hora de reparar el pavimento.

La forma más extendida de proporcionar adherencia entre las capas es aumentando la rugosidad en la interfase de los materiales, previamente a la colocación del hormigón. Gracias a ello se aumenta la adherencia mecánica en la interfase de los materiales y, además, se consigue eliminar los defectos superficiales que puedan existir en el pavimento original.

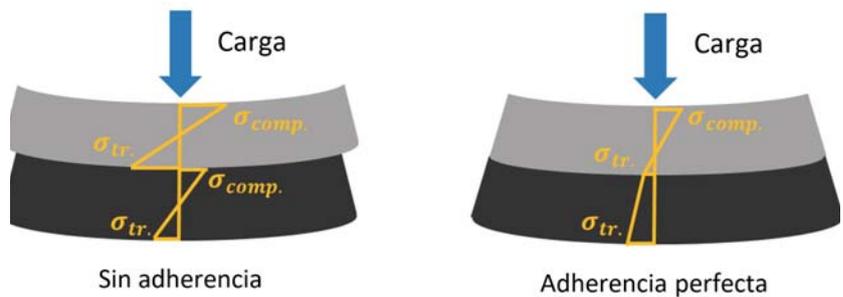


Figura 3. Mecanismo resistente del whitetopping sin y con adherencia.

Sin embargo, en pruebas piloto realizadas por la UPC se han analizado diferentes técnicas innovadoras que pueden mejorar la adherencia entre el firme original y la capa de refuerzo. Dichas técnicas fueron el uso de anclajes mecánicos con tornillos a modo de stud (Figuras 4.a y b) y la colocación de un geotextil entre las capas (Figuras 4.c y d).

Los tornillos stud actúan como un puente mecánico entre las capas de material de forma que se garantiza el contacto entre éstas en el punto de colocación del anclaje. Gracias a ello, el tornillo proporciona conexión mecánica y, por lo tanto, comportamiento monolítico alrededor suyo. Esto permite reducir las deformaciones de alabeo en las losas

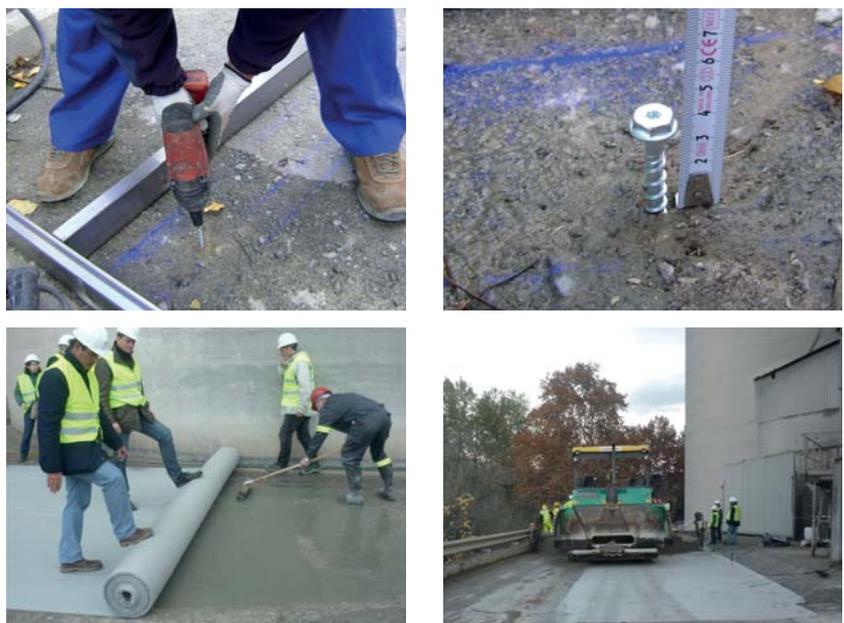


Figura 4. Colocación de anclaje mecánico stud (a) y aspecto final (b). Extensión del geotextil (c). Extendidora trabajando sobre el geotextil (d).

de hormigón debidas a los cambios de temperatura y humedad en el ambiente, evitando que las losas se despeguen del firme original.

La colocación de un geotextil entre un firme existente con un agrietamiento acusado y un nuevo refuerzo de hormigón puede evitar que se reflejen las fisuras en la nueva capa de hormigón. Además, gracias a su elasticidad también pueden aportar otra función interesante como es garantizar un apoyo más uniforme de las losas en presencia de gradientes térmicos. En las pruebas realizadas por la UPC el geotextil evitó por completo que las fisuras de la base fuesen propagadas hacia la superficie del whitetopping, tanto a tempranas edades como tras 3 meses de apertura al tráfico de camiones pesados.

3. Mitigación de los efectos de las islas de calor a través de los pavimentos de hormigón

La urbanización y el aumento de los niveles de actividad social interactúan con los procesos de cambio global tales como el cambio climático y el cambio en el uso del suelo. Los centros urbanos son especialmente vulnerables por el efecto de las islas de calor urbanas (Urban Heat Island, UHI), por el cual las ciudades están sujetas a temperaturas ambientales más altas que las zonas rurales. Tales son las consecuencias de las islas de calor urbana que las diferencias térmicas entre el medio urbano y el medio rural pueden alcanzar los 12 °C en las grandes ciudades (Barnes *et al.*, 2001).

Las Naciones Unidas (United Nations Centre for Human Settlements, 2002) estiman que en el año 2030 el 61% de la población vivirá en ciudades. Fruto de esta concentración urbana, las consecuencias derivadas del efecto de las islas de calor urbano se incrementarán de forma sustancial, causando importantes impactos en la salud de las personas, la economía y el medioambiente.

Los efectos y las causas de las islas de calor urbanas han sido estudiados en profundidad durante los últimos años por organizaciones como el Panel Intergubernamental de Cambio Climático-IPCC (IPCC, 2007). Uno de los retos a los que se enfrenta el conjunto de la población europea durante los próximos años es abordar, a través de una visión integral e integrada, el desarrollo de estrategias efectivas con las que mitigar las islas de calor urbano y su incorporación en nuevas actividades de construcción y mantenimiento de las infraestructuras críticas.

El componente urbano de mayor superficie horizontal expuesta a la radiación es precisamente el pavimento, el cual constituye aproximadamente entre un 29% y un 45% del suelo urbano (Golden, 2004) y que, en la mayoría de los casos, posee alta absorción y elevada capacidad térmica. Estas características hacen que su contribución al efecto de isla de calor urbana (UHI) sea muy significativa (los pavimentos desprenden por la noche el calor acumulado durante el día) particularmente en climas áridos con elevados niveles de radiación, como es el caso del sur de Europa.

Los materiales asfálticos, predominantes en la construcción de pavimentos, tienen mucha facilidad para absorber temperatura de forma que su superficie se mantiene más caliente que el aire, emitiendo el exceso de calor hacia el medioambiente.

Las estrategias para mitigar las islas de calor urbanas a través de los pavimentos de hormigón deben buscar controlar la temperatura del pavimento y su entorno mediante el control de las propiedades termo-físicas del material que influyen sobre el mecanismo en que los pavimentos absorben, almacenan e irradian calor. Entre las variables y propiedades de los materiales que pueden adaptarse para el control térmico cabe destacar el albedo, la permeabilidad, la conductividad, la emisividad, el espesor y el flujo de aire por convección.

A tal efecto, el hormigón se presenta como un material idóneo por su facilidad de adaptación a la solución del problema de la temperatura en las ciudades. En este sentido, los avances en el ámbito de los pavimentos replantean la forma en que se diseñan, optimizando su absorción,

almacenamiento e irradiación de calor. De esta forma se puede aprovechar la gran superficie que estas infraestructuras representan en las ciudades para mitigar los efectos de las islas de calor urbanas, regulando la temperatura ambiente y generando un mayor confort térmico tanto en verano como en invierno, con los importantes beneficios en la salud, la economía y el medio ambiente que ello conlleva. Con ese planteamiento, los autores del artículo proponen tres estrategias diferentes para el diseño de pavimentos:

- 1) Pavimentos piel de reflectancia inteligente para proporcionar una superficie que refleje una mayor cantidad de radiación solar.
- 2) Pavimentos piel de almacenamiento de calor latente para aumentar de la capacidad del pavimento de absorber calor latente (sin aumentar su temperatura).
- 3) Pavimentos de transpirabilidad controlada para permitir que un pavimento se enfríe por evaporación a través del diseño y la construcción de una estructura porosa.

Si bien cada una de las estrategias constituye una línea de investigación propia y, a pesar de que las tres estrategias definidas anteriormente abordan el problema de la isla de calor urbana desde una filosofía diferente, las soluciones pueden considerarse complementarias y su efectividad, suplementaria.

3.1 Pavimentos piel de hormigón con reflectancia inteligente

Estos pavimentos tienen por objetivo proporcionar una superficie que refleje una mayor o menor cantidad de radiación solar en función de la temperatura ambiente. El mecanismo se basa en la idea de que, mediante el aumento de la reflectancia de la superficie del pavimento, menos luz solar será absorbida. Consecuentemente, se reduce la temperatura del pavimento durante el día, lo que a su vez se traduce en una menor temperatura ambiente. Este tipo de materiales, denominados 'fríos', se caracterizan por su:

- Alta reflectancia solar o albedo, la cual mide la capacidad de un material de reflejar la radiación solar incidente,

considerando la reflectancia hemisférica de la radiación integrada en el espectro solar e incluyendo la reflexión especular y la difusa. Su valor se mide en una escala de 0 a 1 (o 0-100%).

- Alta emisión infrarroja, que mide la capacidad de una superficie para liberar -a través de radiación infrarroja- el calor absorbido por el material, en relación con un cuerpo negro de igual temperatura.

Hasta el momento existen únicamente pigmentos con los que aumentar la reflectancia de los pavimentos si bien estas soluciones son caras y poco durables y además afectan significativamente a la adherencia vehículo-pavimento, pudiendo generar situaciones de riesgo. Por ello es necesario abordar un planteamiento alejado del uso de pinturas o pigmentos.

La solución de los pavimentos piel de hormigón con reflectancia inteligente está pensada como capas de rodadura, simulando un *whitetopping*, con las cuales rehabilitar los pavimentos de las ciudades en mal estado. Gracias a ello se aumenta su capacidad portante, con el valor añadido de regular el confort térmico de la ciudad.

3.2 Pavimentos piel de almacenamiento de calor latente

El calor latente es la cantidad de energía que se guarda en un material cuando cambia su estructura molecular, su fase o su estado de hidratación. Esta forma de almacenamiento posee grandes ventajas:

- Gran densidad de almacenamiento, muy superior a la de calor sensible y similar a la de las reacciones termoquímicas.
- Reducción de las pérdidas energéticas derivadas de la variación de temperatura (necesaria en la forma de almacenamiento sensible).
- Posibilidad de selección de la temperatura de trabajo (proceso de carga y descarga energética del material) según las necesidades.

Desde el primer tercio del siglo pasado se han diseñado y fabricado numerosos Materiales de Cambio de Fase (PCM) con diferentes propiedades físicas, químicas, cinéticas, etc. y, por supuesto, térmicas,

para responder a diferentes necesidades, usos y aplicaciones para los que eran requeridos. Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

De entre todas ellas, las aplicaciones de las ceras de parafina han sido las más analizadas. Concretamente, las ceras parafinadas microencapsuladas en esferas poliméricas son un acumulador térmico de cambio de fase. Se trata de microcápsulas que contienen un núcleo de cera que actúa como acumulador de calor latente. Al calentarse o enfriarse, la cera de las cápsulas se funde y se solidifica, respectivamente. Cuando aumenta la temperatura, los materiales en cambio de fase absorben calor, mientras que cuando ésta baja emiten calor. Durante el cambio de fase, la temperatura permanece constante (calor latente), pues la energía térmica se utiliza para alterar el estado del material de cambio de fase. Este proceso es reversible y se produce dentro del rango de fusión de la cera.

En el campo de la edificación, se han desarrollado sistemas de climatización por suelo radiante, y enfriamiento pasivo en oficinas y otros edificios, utilizando sistemas de almacenamiento energético con materiales de cambio de fase. También la utilización de la refrigeración nocturna para la refrigeración diurna se ha demostrado viable en diversos países. La utilización de PCM ha mejorado significativamente en los últimos 25 años, a lo largo de los cuales ha ido apareciendo información sobre sus características [Zalba (2002), Pons *et al.* (2014)], si bien aún le queda un camino importante por recorrer y, entre otros campos, en el de los pavimentos, dado que la aplicación de este tipo de materiales en todo el espesor del pavimento resultaría muy caro y poco eficiente. Por ello, los pavimentos piel de hormigón con almacenamiento de calor latente deberían plantearse como capas de rodadura, a modo de *whitetopping*.

3.3 Pavimentos de transpirabilidad controlada

Los pavimentos de transpirabilidad controlada actúan como las capas de los tejidos

subcutáneos de la piel del cuerpo humano, las cuales buscan constantemente un equilibrio térmico en el ser humano. El funcionamiento de estos pavimentos se basa en dos principios: la ascensión capilar de líquidos en medios porosos en función de la temperatura y la pérdida de calor debido a la evaporación superficial de agua. El objetivo es generar una estructura con una porosidad controlada, que permita una ascensión capilar del agua sin que se produzca una acumulación de la misma en la superficie. Esta agua se evaporará en la superficie del pavimento, provocando en él una reducción de la temperatura fruto del cambio de estado físico del agua. A medida que aumenta la temperatura ambiente, la tasa de evaporación del agua en la superficie del pavimento tenderá a incrementarse produciendo así un efecto de amortiguamiento y estabilización térmica.

En este sentido, los hormigones porosos presentan una serie de propiedades que resultan de gran interés para el desarrollo de este tipo de estrategias de mitigación de los efectos de las islas de calor urbano (Fresno *et al.*, 2005), entre las que destacan: el poseer una alta capacidad de drenaje, un bajo peso específico aparente, unas óptimas resistencias a los ciclos de hielo/deshielo y ser buen conductor de aire (Yang y Jiang, 2003).

Históricamente el uso del hormigón poroso fracasó debido a su baja durabilidad, pobre resistencia mecánica (resistencias a compresión máximas alcanzadas de entre 15 y 20 MPa), y escasa resistencia a la abrasión superficial, excluyéndose su empleo como material para la construcción de pavimentos expuestos al tráfico pesado. Otro problema comúnmente observado es la colmatación de los poros de la matriz debido a la filtración de partículas sólidas que comprometen la capacidad drenante del hormigón.

A lo largo de los años, en nuestro entorno de la Universidad Politécnica de Catalunya se ha adquirido experiencia en el desarrollo, caracterización y modelización de hormigones porosos. A través de diferentes proyectos ha profundizado en el estudio teórico y experimental de esta tipología de hormigones con el fin de reducir o eliminar todas estas problemáticas (Pieralisi *et al.*, 2015; Pieralisi *et al.*, 2016).

4. Otras innovaciones en pavimentos para hormigones

4.1 Pavimentos conductores

El desarrollo de hormigones conductores para pavimentos se basa en la incorporación de materiales conductores en la matriz del hormigón. Para conseguir las características conductoras del hormigón pueden incorporarse subproductos de otros procesos industriales, como por ejemplo escoria siderúrgica y/o fibra de carbono reciclada, o conductores comerciales como fibra metálica estructural.

Además de las aplicaciones en pavimentos termoreguladores con capacidad calefactora, también puede obtenerse pavimentos con propiedades sensoras capaces de aforar vehículos, detectar esfuerzos mecánicos e incluso a su vez transmitir información (Han *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017). Este tipo de pavimento puede, además, permitir la automatización del alumbrado público o la monitorización del estado del pavimento, lo que puede contribuir también a optimizar su proceso de mantenimiento.

4.2 Pavimentos con hormigones fotocatalíticos

Una de la innovación más extendida en el ámbito de los pavimentos es la utilización de hormigones fotocatalíticos con el objetivo de reducir la concentración de NOx, SOx o los bencenos del aire. En presencia de luz solar (o de otro tipo, de longitud de onda inferior a 400 nm), estos pavimentos transforman estas sustancias en otras no tóxicas, a un ritmo treinta veces más rápido que el que se produciría de manera natural. Las sustancias obtenidas son sales inorgánicas comunes (como nitratos, sulfatos y carbonatos), que pueden ser posteriormente arrastradas por la lluvia o permanecer en forma biodegradada en la tierra (Hüsken *et al.*, 2009; Beeldens y Boonen, 2012).

4.3 Pavimentos con biohormigones autoreparadores

Otras idea innovadora y disruptiva en el campo de los hormigones y que presenta una aplicación directa en pavimentos son los biohormigones capaces de auto-repararse desarrollados por un grupo de investigadores neerlandeses de la Universidad Técnica de Delft. Este tipo de hormigones utiliza bacterias encapsuladas en estado latente (Figura 5.a) que, al producirse una fisura y al penetrar el agua en su interior, se activan y liberan carbonato cálcico que repara las fisuras (de Rooij *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014; Tziviloglou *et al.*, 2016).

Otros investigadores han trabajado en el uso de polímeros capaces de absorber hasta 500 veces su propio peso en agua y que pueden ayudar a sellar las fisuras o estimular su reparación si se incorporan en el hormigón autorreparable. Por otro lado, también se han hecho estudios acerca del uso de cápsulas que se quiebran al producirse una fisura y que desprenden un líquido que las sella.

4.4 Pavimentos de hormigón lumínico

Finalmente hay que destacar la utilización de pavimentos con hormigón lumínico (Figura 5.b). Esta solución ha sido ya utilizada por el Ayuntamiento de Cambridge (Reino Unido) en una prueba piloto (The Telegraph, 2016) y, a raíz de los buenos resultados obtenidos, se plantean extender la experiencia en otras vías públicas de la localidad. El principio básico de este hormigón consiste en añadir áridos de minerales luminiscentes, generalmente de composición silíceo, en la dosificación del hormigón. Con un promedio de carga

de 6 horas (carga lumínica con luz natural y/o artificial) es posible obtener un pavimento que se ilumine intensamente durante un rango de tiempo de 8 a 10 horas (Han *et al.*, 2017).

5. Conclusiones

De lo anteriormente expuesto, se deducen avances significativos en cuanto a las prestaciones de los pavimentos y más, en entornos urbanos, a los que se les aporta valores añadidos significativos. Ello puede ser el origen de un cambio de paradigma en el sector, al ser las empresas que aportan estas tecnologías, las que serán las verdaderas protagonistas de estas infraestructuras, pudiendo substituir a las tradicionales empresas de construcción, como ya ha empezado a pasar en otros ámbitos de aplicación.

Por otro lado, para afrontar estos retos, hay que ser optimista con la capacidad de respuesta que pueden dar tanto el sector empresarial como el académico de nuestro país, siempre y cuando se favorezca las políticas de innovación en el desarrollo de nuevas infraestructuras (fórmulas existen, si bien hay que emplearlas sistemáticamente).

Bibliografía

1. Baladi, G.Y.; Novak, E.C.Jr. y Kuo, W. H. "Pavement condition index remaining service life. In Pavement Management Implementation". Eds F. B., Holt and W. L., Gramling, STP 1121, American Society for Testing and Material, Philadelphia, PA, pp. 63–90 (1992).

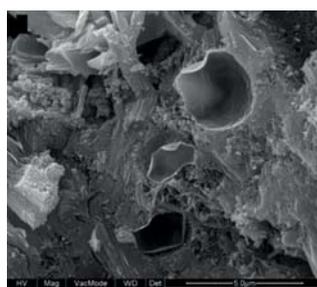


Figura 5. Detalle de mortero con un 3% de microcapsulas (izquierda). (Fuente: Wang *et al.*, 2014). Pavimento lumínico construido en Cambridge (derecha). (Fuente: The Telegraph, 2016).

2. Barnes, K.; J. Morgan y M. Roberge. "Impervious Surfaces and the Quality of Natural and Built Environment". Department of Geography and Environmental Planning, Towson University, Baltimore, Md., 2001.
3. Beeldens, A., & Boonen, E. "A double layered photocatalytic concrete pavement: a durable application with air-purifying properties". In 10th International Conference on Concrete Pavements (2012).
4. Blanco, A. "Characterization and modelling of SFRC elements". (Tesis doctoral, 2013). Universidad Politécnica de Catalunya.
5. Chen, M.; Gao, P.; Geng, F.; Zhang, L., y Liu, H. "Mechanical and smart properties of carbon fiber and graphite conductive concrete for internal damage monitoring of structure". *Construction and Building Materials*, 142, 320-327 (2017).
6. de Rooij, M.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N. y Schlangen, E. "Self-healing phenomena in cement-Based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: self-Healing phenomena in cement-Based materials (Vol. 11)". Springer Science & Business Media, eds. 2013.
7. Fresno, D.C.; Bayón, J.R.; Hernández, J.R. and Muñoz, F.B. "Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), (2005). *Interciencia*, 30 (5), pp.255-260+306-308.
8. Golden, J.S. "The Built Environment-Induced Urban Heat Island Effect in Rapidly Urbanizing Arid Regions: A Sustainable Urban Engineering Complexity". *Environmental Sciences*, vol. 1, nº 4, pp. 321-349 (2004).
9. González Ortega, M.A. Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF. (Tesis doctoral, 2015). Universidad Politécnica de Catalunya.
10. Han, B., Ding, S., & Yu, X. "Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review". *Measurement*, 59, 110-128 (2015).
11. Han, B.; Zhang, L. y Ou, J. "Light-Emitting Concrete. In Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures". Springer Singapore, pp. 285-297 (2017).
12. Hüsken, G.; Hunger, M. y Brouwers, H.J.H. "Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification". *Building and environment*, 44(12), 2463-2474 (2009).
13. Hutchinson, R.L. "Resurfacing with portland cement concrete. NCHRP synthesis of highway practice 99". National Cooperative Highway Research Program (1982).
14. IPCC (2007) AR4 Synthesis report, Full Report. Intergovernmental Panel on Climate Change.
15. López-Carreño, R.D.; Pujadas, P.; Cavalaro, S.H.P. y Aguado, A. "Bond strength of whitetoppings and bonded overlays constructed with self-compacting high-performance concrete". *Construction and Building Materials*, 153, 835-845 (2017).
16. McGhee, K.H. "Portland cement concrete resurfacing. National Cooperative Highway Research Program". Transportation Research Board (1994).
17. Mena Sebastián, F. Características estructurales del hormigón con árido reciclado mixto reforzado con fibras. (Tesis doctoral, 2015). Universidad Politécnica de Catalunya.
18. Oliveira, M.J.; Ribeiro, A.B. y Branco, F.G. "Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete". *Construction and Building Materials*, 52, 267-275 (2014).
19. Osorio, A.; A. Chamorro, S. Tighe y C. Videla. "Calibration and Validation of Condition Indicator for Managing Urban Pavements Networks". In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº 2455, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 28-36 (2014).
20. Pieralisi, R.; Cavalaro, S.H.P. y Aguado, A. "Evolutionary lattice model for the compaction of pervious concrete in the fresh state". *Construction and Building Materials*, 99, 11-25 (2015).
21. Pieralisi, R.; Cavalaro, S.H.P. y Aguado, A. "Discrete element modelling of the fresh state behavior of pervious concrete". *Cement and Concrete Research*, 90, 6-18 (2016).
22. Pons, O.; Aguado, A.; Fernández, A.I.; Cabezas, L.F. and Chimenos, J.M. "Review of the use of phase change materials (PCMs) in building with reinforced concrete structures". *Materiales de Construcción*, vol. 64, número 315, julio-septiembre de 2014, e031.
23. Pujadas, P. Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas. (Tesis doctoral, 2013). Universidad Politécnica de Catalunya.
24. Pujadas, P.; Pardo-Bosch, F.; Aguado-Renter, A. y Aguado, A. "MIVES multi-criteria approach for the evaluation, prioritization, and selection of public investment projects. A case study in the city of Barcelona". *Land Use Policy*, 64, 29-37 (2017).
25. Rasmussen, R.O. "Thin and ultra-thin whitetopping: A synthesis of highway practice". NCHRP Synthesis, 338 (2016).
26. Schmidt, C. y Schmidt, M. "Whitetopping of asphalt and concrete pavements with thin layers of Ultra-High-Performance Concrete: Construction and economic efficiency". *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, pp. 921-927, 2012. Kassel (Alemania).
27. The Telegraph. "Blue glowing 'starpath' could be the future of street lighting". 2016. <http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/10391802/starpath-glow-street-lighting-council-cambridge-city.html>
28. Tziviloglou, E.; Van Tittelboom, K.; Pailin, D.; Wang, J. y Sierra-Beltrán, M.G.; Erşan, Y. Ç. y De Belie, N. "Bio-based self-healing concrete: from research to field application. In *Self-healing Materials*". Springer International Publishing, pp. 345-385 (2016).
29. United Nations Population Fund. *Global Population Hits 6 Billion. State of World Population 2002*.
30. Wang, J. Y.; Soens, H.; Verstraete, W. y De Belie, N. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, 56, 139-152 (2014).
31. Yang, J., y Jiang, G. "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials". *Cement and Concrete Research*, 33(3), 381-386 (2003).
32. Zalba, B. Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza, Zaragoza (2002).