(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 687 713**

(21) Número de solicitud: 201830642

(51) Int. CI.:

C04B 26/26 (2006.01)
E01C 3/00 (2006.01)

(12) PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN B2

(22) Fecha de presentación:

27.06.2018

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

26.10.2018

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

17.01.2019

Fecha de concesión:

25.06.2019

(45) Fecha de publicación de la concesión:

02.07.2019

(73) Titular/es:

CHM OBRAS E INFRAESTRUCTURAS S.A. (100.0%)
Avda. Jean Claude Combaldieu s/n
03008 Alicante (Alicante) ES

(72) Inventor/es:

SIMÓN GRAU, José

(74) Agente/Representante:

FUENTES PALANCAR, José Julian

(54) Título: **Pavimentos asfálticos de alta reflectancia solar**

(57) Resumen:

Pavimentos asfálticos de alta reflectancia solar, con índice SR igual o superior a 33% conforme a certificación LEED v4 BD+C, para mezclas continuas AC y discontinuas BBTM, caracterizados por parámetros físico-químicos determinantes del tipo y composición de las mezclas que influyen favorablemente en la reflectancia de todo el espectro de radiación solar, UV-VIS-IR, tales como naturaleza mineralógica del árido, granulometría, porosidad y textura superficial, y tipo de ligante y aditivos de pigmentos de óxidos metálicos utilizados. Como realizaciones preferentes se han desarrollado mezclas AC16 D, mezclas de rodadura de capa fina tipo BBTM 5A o BBTM 8A, y pavimentos reflectantes con propiedades antideslizantes, y se ha contemplado la posibilidad de incluir en las mezclas material de reciclado RAP. Con estos nuevos pavimentos se reduce el calentamiento de las superficies de las ciudades, y en consecuencia la temperatura ambiente, principalmente en verano, mitigando el efecto de isla de calor urbana.

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 687 713 B2

DESCRIPCION

Pavimentos asfalticos de alta reflectancia solar.

El objeto de la presente invención a los fines de patente, es una gama de pavimentos asfálticos para mezclas continuas AC y discontinuas BBTM de alta reflectancia solar “SR” o albedo, igual o superior a un 33%, que es el valor exigido por la certificación LEED v4 BD+C para que puedan ser catalogados como superficies reflectantes mitigadoras del efecto de isla de calor.

Estos pavimentos se rigen por parámetros físico-químicos determinantes del tipo y composición de las mezclas asfálticas, conforme al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Carreteras y Puentes PG-3, como son naturaleza mineralógica del árido, granulometría de la mezcla, porosidad y textura superficial, tipo de gigante, y aditivos de pigmentos de óxidos metálicos utilizados, que se ha constatado influyen favorablemente en la reflectancia de todo el espectro de radiación solar, UV-VIS-IR, es decir, no solo en la región del visible, de lo que dependerá en buena medida el color y tonalidad de los firmes, sino también y muy particularmente, en la región del infrarrojo IR, que supone el 52% de la energía solar incidente en la superficie terrestre; de ahí los altos valores de reflectancia conseguidos.

En el proceso de desarrollo se ha investigado primero en el laboratorio los materiales y características estructurales de las mezclas bituminosas a fin de definir los criterios de diseño que permiten conseguir los niveles de SR objetivo, para después definir las fórmulas de trabajo de las mezclas reflectantes idóneas, mediante la fabricación de pavimentos normalizados, y estudiar su comportamiento y funcionalidad a corto y medio plazo.

Como realizaciones preferentes reivindicadas de invención se han desarrollado mezclas AC16 D de alta capacidad reflectante, mezclas de rodadura de capa fina tipo BBTM 5A o BBTM 8A, con la finalidad de compensar el sobrecoste que supone la implantación de estos nuevos firmes, y pavimentos reflectantes con propiedades antideslizantes. También se ha contemplado la posibilidad de incluir en las mezclas material procedente del fresado de firmes de asfaltos (RAP), y aunque no se ha llegado al nivel de reflectancia objetivo para este tipo de pavimentos de reciclado, sí se ha conseguido mejorar su capacidad reflectante.

Con estos nuevos pavimentos reflectantes se reduce el calentamiento de las superficies de las ciudades y núcleos urbanos, y en consecuencia la temperatura ambiente, principalmente

en verano, mitigando el efecto de isla de calor urbana, lo que implica beneficios tales como el ahorro de energía en aire acondicionado y consumo de alumbrado público, mejora de la calidad del aire, y de la comodidad y salud de los peatones.

CAMPO TÉCNICO.-

El campo técnico en el que se encuadra la presente invención es el de la construcción o revestimiento de firmes de calles y carreteras de base asfáltica, es decir, con capas de rodadura hechas de mezclas bituminosas.

ESTADO DE LA TÉCNICA.-

El cambio de vida de la población de pasar de habitar en zonas rurales a zonas urbanas ha provocado una proliferación de grandes urbes, en las cuales se presenta un fenómeno conocido como “Isla de Calor Urbana-ICU”, definido como la diferencia de gradiente térmico entre áreas desarrolladas y no desarrolladas. Este fenómeno se produce cuando el área urbana es significativamente más caliente que las áreas circundantes, lo que se debe a que se han sustituido superficies rurales generalmente verdes y húmedas por otras superficies que están hechas de materiales de alta capacidad térmica y baja reflectancia solar, como son el asfalto, hormigón, tejas, ladrillo, membranas impermeabilizantes oscuras, etc., capaces de absorber y almacenar energía en forma de calor, producido un calentamiento del aire colindante, con un aumento de temperatura que puede rondar los 4ºC. Este hecho, unido a otros factores crea un efecto de sobrecalentamiento del área urbana.

Las islas de calor urbanas pueden afectar negativamente a la comunidad, siendo estos efectos perniciosos para la calidad del aire, la salud de las personas y para el consumo energético

Los pavimentos tradicionales en las ciudades, que representan alrededor de un tercio de las superficies urbanas, se calientan con el sol (ver Figura 3) y absorben entre el 80 y el 95% de la energía solar incidente. En pleno verano un firme con mezcla bituminosa puede alcanzar los 70ºC en la superficie. Estos pavimentos agravan el efecto de isla de calor urbana calentando el aire a nivel local. El calor absorbido, por convección pasaría a la atmósfera, calentado el aire y por lo tanto aumentaría la temperatura ambiente, siendo más notorio este incremento en las horas de la tarde-noche.

Para reducir este sobrecalentamiento de los firmes de calles y carreteras de núcleos urbanos, y consecuentemente mitigar el efecto isla de calor, son conocidas diferentes técnicas tendentes a incrementar la reflectancia solar “SR” o albedo de los pavimentos, es decir, la capacidad que tiene la superficie de los pavimentos para reflejar la luz del sol, en base al principio constado de que a mayor SR de la superficie del pavimento, mayor enfriamiento y menor Tª superficial, y menor Tª ambiente.

Este es el caso, por ejemplo, de tejas y baldosas de hormigón de colores con pinturas reflectantes de implantación reciente en diferentes ciudades de Grecia, o los pavimentos de hormigón de varios colores con pinturas reflectivas que se están desarrollando en Tirana (Albania).

Algunas de estas técnicas se encuentran patentadas, pudiendo citarse como ejemplo las patentes japonesas con número de publicación JP2004218301 y JP2005061042, que tienen por objeto capas de pinturas que contienen un pigmento de alta reflectancia de radiación solar dispuestas en la superficie del cuerpo de los pavimentos, o la también patente japonesa JP2012087502, sobre un pavimento formado sobre una superficie ya pavimentada, que comprende una primera capa de aislamiento térmico a base de agregados y aglutinante, y una capa superior capaz de reflejar la luz solar. La patente China CN202509360, propone a un pavimento asfáltico brillante de alta reflexión formado sobre una estructura de pavimento asfáltico bituminoso preexistente, compactando a presión una capa de agregado de alta reflectividad que queda incrustada en la capa superficial asfáltica, y la patente norteamericana US2010247753, para una invención que mejora la reflectancia de los pavimentos mediante un revestimiento sobre la superficie a base de una resina como aglutinante y al menos un pigmento negruzco que tiene una apreciable reflectancia de radiación solar.

En todos los casos, estas técnicas para conseguir pavimentos reflectantes, normalmente a base de capas de pinturas y diversos recubrimientos, se aplican sobre pavimentos preexistentes o de reciente implantación, es decir, no influyen en el tipo y composición de las mezclas asfálticas de los pavimentos de primera implantación, lo que supone un importante coste adicional en acondicionamiento de calles y carreteras.

Una alternativa sería pavimentar las calles con firmes con capacidad de reflectancia solar intrínseca, que por determinados parámetros físico-químicos con propiedades reflectantes determinantes del tipo y composición de las mezclas asfálticas en que los pavimentos consisten, como por ejemplo puede ser una determinada coloración del ligante, reflejen la

energía solar que incide durante el día en una mayor medida que los pavimentos convencionales, manteniendo la temperatura superficial más baja y reduciendo más la temperatura ambiente.

En el estado de la técnica existen algunas divulgaciones relevantes de este tipo de pavimentos, como por ejemplo la patente europea con número de publicación en España ES2196277-T3 por una “Capa de aglutinante transitable y procedimiento de preparación", que consiste en un pavimento constituido por una capa primaria de aglutinante de agarre y una capa de protección acuosa sobre la misma, que comprende uno o varios constituyentes opacos capaces de reflejar las radiaciones luminosas, elegidos entre un espesante, una carga mineral y una carga orgánica; o la también patente europea ES2605729-T3, para una "Composición de aglutinante asfáltico pigmentable", caracterizada por una mezcla de agregados de color claro, entre los que se incluyen piedra caliza, un aglutinante asfáltico pigmentable a base de cemento asfáltico de petróleo (CAP), diversos residuos de desasfaltado y/o de vacío, pigmentos inorgánicos, que pueden ser TiO_2, y opcionalmente un relleno, seleccionado entre la cal hidratada y/o cemento Portland, para conseguir pavimentos coloreados y decorativos manteniendo la reflexión de la luz a niveles similares a los de los pavimentos rígidos usuales.

Caben citar también la solicitud de patente internacional de origen JP WO2016163346-A1, para un pavimento aislante del calor formado por una capa base de asfalto u hormigón y una capa de agregado sobre la misma con una dotación en partículas de blancos que tienen un efecto de aislamiento térmico mejorado en comparación con las partículas de agregado convencionales, que es de diferente composición; y la patente coreana KR20150062330-A, referida a un material de recubrimiento coloreado de reflexión de radiación solar para construir un pavimento de carreteras ecológico, pulverizando una resina de aceite cuando se forma una capa de revestimiento después de pulverizar la sílice.

Todas estas soluciones patentadas de pavimentos de mayor capacidad reflectante frente a la radiación solar se basan en composiciones que sólo proporcionan una determinada coloración a las mezclas, normalmente en tonos claros, utilizando agregados de color claro, aglutinantes asfalticos pigmentables, dotaciones de partículas de blancos, etc., que mejoran las propiedades reflectantes frente la radiación del espectro visible, y sin cuantificar en qué medida la reflectancia solar se ve incrementada en relación con los firmes convencionales. Son soluciones más de embellecimiento de los firmes de calles y carreteras, que simultáneamente reducen la temperatura superficial.

La reflectancia solar “SR” de una superficie se define como la fracción o porción de la radiación solar incidente que se refleja en dicha superficie; es decir, mediante la relación:

SR = Energía solar reflejada / Energía solar incidente

El valor oscila entre 0 para las superficies sin reflectancia, hasta 1 para las superficies de reflectancia total. Véase en la **Figura 1** una representación de esta escala de SR, en la que también se pueden dar los valores en tanto por ciento, y que también sirve para cuantificar la absorbancia, que es el concepto inverso a la reflectancia.

La radiación que alcanza la Tierra, que se traduce en la energía solar incidente, oscila entre 300 y 2500nm, siendo el resto rechazada por la atmósfera. Este rango de longitudes de onda se divide en tres espectros electromagnéticos:

- Espectro Ultravioleta UV: Longitudes de onda entre 300-400nm.
- Espectro Visible VIS: Longitudes de onda entre 400-700nm.
- Espectro infrarrojo IR: Longitudes de onda entre 700-2500nm.

Aproximadamente el 5% de la energía (radiación solar) que incide en la superficie terrestre corresponde al espectro ultravioleta (UV), el 43% al espectro visible (VIS) y un 52% al infrarrojo (IR).

Al estar compuesto el espectro solar por los espectros UV, VIS e IR, se puede determinar dentro de la reflectancia solar total de una superficie, la parte reflejada en el espectro ultravioleta UVR, en el espectro visible VISR, que es la que depende del color de la superficie, y en el infrarrojo IRR.

Esto quiere decir, que la reflectancia solar SR de una superficie asfáltica va a depender en un 43% de la tonalidad o color de la mezcla, la que corresponde a la parte reflejada en el espectro visible VISR, mientras que el resto, UVR y IRR, dependerá del resto de propiedades físico-químicas del tipo y composición los pavimentos.

Por eso, para conseguir pavimentos asfalticos con la máxima reflectancia solar SR, que es el objetivo de la presente invención, deben definirse criterios de diseño de las mezclas para que reflejen la máxima energía posible de todo el espectro de radiación solar, UV-VIS-IR.

Establecida esta pauta, surge el problema de determinar los valores de SR que sean admisibles para el fin último perseguido, el que los pavimentos desarrollados pueda ser consideraos tienen valores de SR suficientes para para que contribuyan a minimizar el efecto de islas de calor en las ciudades, ya que actualmente, en España no hay normativa específica sobre las características que tienen que tener las superficies para que se cataloguen como de alta reflectancia solar, siendo necesario recurrir para ello a la normativa internacional.

El sistema de Certificación LEED v4- ND auspiciada por US Green Building Council para el Desarrollo de Zonas Residenciales, en el capítulo GIB CREDIT: HEAT ISLAND REDUCTION, marca las medidas a adoptar en las superficies horizontales de los pavimentos a fin de minimizar los efectos de dicho desarrollo sobre microclimas, hábitats humanos y la vida silvestre, reduciendo el efecto de islas de calor.

Según los requisitos establecidos por este sistema de Certificación, se considera que un material es reflectante si el valor de reflexión solar SR a los tres años de su puesta en obra es de al menos el 28% (0,28); para materiales nuevos se utilizaran aquellos con un SR de al menos el 33% (0,33). Por lo tanto el valor de reflectancia solar SR de 33% es el que va servir como referencia para el diseño de las mezclas reflectantes objetivo.

Los criterios de diseño que se han estudiado son parámetros físico-químicos característicos de las mezclas asfálticas, plasmados en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Carreteras y Puentes “PG-3” y en la normativa específica, pero que pueden influir favorablemente en la Reflectancia Solar-SR y a su vez en la temperatura superficial en su exposición al sol. Son parámetros relativos al tipo y composición de las mezclas, como la naturaleza de los áridos, ligante y aditivos, de los que dependerá en buena medida la reflectancia en el espectro visible, pero también de características estructurales y geométricas, como la granulometría, porosidad y textura superficial, que afectara a la reflectancia UV e IR.

COMPENDIO DE LA INVENCIÓN.-

Los pavimentos asfálticos de alta reflectancia solar o albedo que se reivindican de invención, son el resultado de dicho estudio experimental de los parámetros físico-químicos determinantes del tipo y composición de las mezclas, llevado a cabo en laboratorio y posterior fabricación en planta piloto de muestras a ensayo, para conseguir un índice SR

igual o superior a 33% conforme a certificación LEED v4 BD+C, que es el exigido por dicha certificación para ser catalogados como superficies reflectantes.

Estos pavimentos han sido desarrollados para los dos tipos de mezclas bituminosas en caliente que se utilizan comúnmente como capas asfálticas de rodadura en calles y carreteras: mezclas de hormigón bituminoso tipo AC, conforme a UNE-EN 13108-1, y mezclas discontinuas tipo BBTM, conforme a UNE-EN 13108-2, siendo los parámetros físico-químicos que se utilizan como criterios de diseño, los siguientes:

- Áridos calizos para gruesos y finos
- Menor tamaño máximo de árido grueso;
- Ligante sintético pigmentable, de tonalidad clara o incoloro;
- Óxidos de titanio blancos, óxidos de hierro rojos y/u óxidos de hierro amarillos como aditivos;
- Granulometría densa/semidensa; tipo D o S para mezclas AC, o tipo A o B para mezclas discontinuas BBTM;
- Menor cantidad de huecos
- Menor textura superficial (baja macroextrutura);

Para mezclas AC con tamaño máximo de árido de 16 mm, dióxido de titanio (TiO_2) blanco como aditivo, granulometría tipo D, y cantidad de huecos máxima de 7%, se ha conseguido un índice SR entorno al 50%, de modo que, en una realización preferente, se proponen mezclas tipo AC16 SURF D, con ligante sintético pigmentable y TiO_2 como aditivo, en una dotación de mínima de ligante de 5,5% en masa sobre el total de la mezcla.

Para mezclas discontinuas BBTM, con tamaño máximo de árido de 8 mm, dióxido de titanio (TiO_2) blanco como aditivo, granulometría tipo A, y cantidad de huecos máxima de 16%, se ha conseguido un índice SR entorno al 42%, que también es muy buen resultado, de modo que, atendiendo al catálogo de firmes del PG-3, se propone como realizaciones preferentes para mezclas de rodadura de capa fina, mezclas tipo BBTM 5A o BBTM 8A, con ligante sintético pigmentable y TiO_2 como aditivo, en una dotación mínima de ligante de 5,75 % en masa sobre el total de la mezcla.

Con vistas a propiedades antideslizantes de estos pavimentos reflectantes, se pueden sustituir en los agregados de áridos calizos, los áridos calizos gruesos por áridos porfídicos de similar granulometría, manteniendo el índice SR por encima del nivel exigido

Otro material que puede ser utilizado en el desarrollo de estas mezclas reflectantes, es el material de reciclado, procedente del fresado de firmes de asfaltos (RAP), si bien en este caso no se alcanzan los niveles de reflectancia objetivo, por lo que este material debe ser utilizado en bajas proporciones y con una finalidad de una simple mejora de las propiedades reflectantes

Se proponen pavimentos asfálticos mejorados frente a la reflectancia solar, para mezclas de AC y BBTM del tipo y composición que las anteriores, compuestas por una tasa de material reciclado procedente de fresado de firmes de asfaltos (RAP) tipo AC16 SURF S, de hasta un 25%.

Las ventajas que se van a tener mitigando el efecto de isla de calor urbana con la implantación de los pavimentos de alta reflectancia solar - SR desarrollados, son las siguientes:

- Ahorro de energía en aire acondicionado. Al disminuir la temperatura ambiente, se reducirá el consumo de aire acondicionado en los edificios colindantes a las zonas con pavimentos de alta reflectancia.

- Ahorro de energía en el consumo de alumbrado público. Los firmes de alta reflectancia son de tonalidades claras y son superficies de alta luminancia, por lo tanto provocan una buena reflexión de la luz incidente. Esta propiedad hace que sea necesaria menos intensidad de luz artificial nocturna para obtener buena percepción visual, por lo tanto dichos firmes pueden contribuir a un ahorro en el consumo de energía eléctrica en el alumbrado público.

- Mejora de la calidad del aire. El aire más cálido acelera la formación de smog- ozono troposférico a partir de los contaminantes atmosféricos como son los óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV,s). Al disminuirse la temperatura ambiental por acción de los pavimentos reflectantes, estas reacciones fotoquímicas tienden a ralentizarse.

- Mejora de la comodidad y de la salud de los peatones. Menores temperaturas ambientes rebaja el estrés térmico, unido a la mejora de la calidad del aire puede ayudar a mejorar enfermedades directamente relacionadas con el calor (deshidratación, calambres, golpe de calor, síncope por calor...) y con las vías respiratorias (como asma o EPOC), arritmias, etc.

FIGURAS y DIAGRAMAS.-

Al final de la presente memoria descriptiva se incluyen las siguientes figuras y gráficos de resultados de los sucesivos ensayos realizados en el diseño y desarrollo de los nuevos pavimentos reflectantes, a los que se hace referencia en al apartado forma de realización:

- **Figura 1**: Representación de la escala de reflectancia solar “SR”.

- **Figura 2**: Gráfico de reflectancias del espectro solar (250-2400nm)

- **Figura 3**: Gráfico de reflectancias del espectro solar para los dos tipos de árido propuestos: calizo y porfídico

- **Figura 4**: Gráfico de reflectancias del espectro solar para los dos tipos de ligantes probados: ligante betún 35/50 y ligante sintético.

- **Figura 5**: Gráfico de reflectancias del espectro solar para mezclas con betún negro 35/50 y diferentes tipos de pigmentos.

- **Figura 6 y 7**: Gráficos de reflectancias del espectro solar para mezclas con ligantes sintético y diferentes tipos de pigmentos.

- **Figura 8**: Representación del mecanismo de reflexión de la radiación solar sobre un firme asfaltico: (a) superficie lisa AC; (b) rugosa BBTM-11A y (c) porosa BBTM-11B.

- **Figuras 9 y 10**: Gráficos de curvas de evolución de la temperatura superficial a la exposición de la radiación solar para diferentes mezclas bituminosas.

- **Figura 11**: Huso granulométrico para una fórmula de trabajo AC16 D.

- **Figura 12**: Gráfico de curvas de evolución de la temperatura superficial a la exposición de la radiación solar para mezclas BBTM-11B y AC16 D

- **Figura 13**: Gráfico de temperaturas máximas alcanzadas por las mezclas BBTM-11B y AC16 D

- **Figura 14**: Gráfico máximas disminuciones de temperaturas alcanzadas por dichas mezclas.

- **Figura 15**: Gráfico de simulación de la disminución de temperatura superficial con el incremento de SR respecto a un pavimento convencional.

- **Figura 16**: Gráfico de curvas de evolución de la temperatura superficial para mezclas AC16 D

- **Figura 17**: Gráfica de correlación entre SR y antigüedad del firme.

- **Figura 18 y 19**: Grafico de barras de temperaturas máximas superficiales para diferentes tipos de mezclas.

- **Figura 20**: Huso granulométrico para una fórmula de trabajo BBTM 5A.

- **Figura 21**: Reflectancias del espectro solar para pavimento reflectante, pavimento convencional y nieve.

FORMA DE REALIZACIÓN.-

El proceso de desarrollo de los nuevos pavimentos reflectantes ha sido realizado en dos fases o tareas: En una primera (1) se ha investigado en el laboratorio los materiales y características estructurales de mezclas asfálticas normalizadas que mejoran su capacidad reflectante hasta los niveles objetivo, midiendo la SR en diversas muestras mediante espectrofotómetro y otros métodos de ensayo, a fin de definir los criterios de diseño en cuanto a tipo y composición de las mezclas idóneas; y, en una segunda (2), se han definido las fórmulas de trabajo de las mezclas reflectantes idóneas en base a las consideraciones de diseño obtenidas, mediante la fabricación de pavimentos normalizados, y se ha estudio de su comportamiento y funcionalidad a corto y medio plazo.

Dentro de dicha mezclas reflectantes idóneas se han desarrollado y ensayado, como realizaciones de pavimentos particulares, mezclas asfálticas con propiedades antideslizantes, sustituyendo los áridos calizos por porfídicos, y mezclas asfálticas para capa fina de rodadura. La inclusión en las mezclas de material procedente de fresado-RAP en una Tasa hasta el 25%, también ha sido contemplada.

1. Investigación del tipo y composición de las mezclas idóneas.-

Una mezcla asfáltica se compone básicamente de un ligante, áridos, aditivos para mejorar alguna prestación o característica deseable, y ocasionalmente, un porcentaje de material reciclado proveniente del fresado de pavimentos asfálticos (RAP) de las carreteras.

En esta primera investigación se ha realizado la caracterización de áridos, material procedente de fresado RAP, ligantes y pigmentos de óxidos metálicos utilizados como aditivos, en cuanto a la capacidad reflectante tanto del visible como del espectro infrarrojo, y se ha estudiado también la forma en que contribuye a mejorar dicha capacidad los parámetros de textura y porosidad de las mezclas.

La caracterización de los materiales componentes de las mezclas asfálticas y de los parámetros estructurales de las mismas se ha realizado en base al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Carreteras y Puentes- PG-3, mediante medidas de la reflectancia solar por diferentes métodos, lo que ha permitido conocer a priori el tipo y composición idóneos de las mezclas reflectantes a desarrollar.

1.1. Métodos utilizados para la medición de reflectancia solar “SR”.-

Se han utilizado dos métodos de ensayo para medir las reflectancias en los materiales y en las mezclas desarrolladas: En uno se ha utilizado un espectrofotómetro, que mide reflectancias en muestras de laboratorio, y en el otro un piranómetro, para medir las reflectancias solares en superficies de pavimentos ya construidos.

Espectrofotómetro.-

Para medir la reflectancia solar en superficies planas se ha utilizado un espectrofotómetro UV-VIS-IR, con esfera de integración siguiendo la norma ASTM E 903-12. Es el método idóneo para muestras pequeñas de laboratorio, de 5 x 5 cm de tamaño, pero no sirve para medir reflectancias en superficies de campo. El rango de medida está entre 300 y 2500nm de longitud de onda.

Se ha establecido un espectro solar estándar contemplado en la norma ASTM G173 AM 1,5 G donde se muestra los valores espectrales de la irradiación solar en W / m².nm de cada longitud de onda, lo que permite obtener el valor de reflectancia solar expresado en % y en tanto por uno. Con los valores de reflectancias en cada valor de longitud de onda se puede

representar gráficamente y observar las reflectancia en cada uno de los tres espectros, UV, VIS e IR. En el gráfico de la **figura 2** representan las reflectancias del espectro de 250-2400nm.

Piranómetro.-

La reflectancia solar se define como el cociente de la radiación solar reflejada por una superficie por la radiación solar que incidente sobre la misma. Por lo tanto, se puede calcular la reflectancia solar a partir de la medición de la intensidad de la radiación solar, incidente y reflejada por una superficie en un momento dado.

La norma ASTM E1918 (ASTM 2006) describe un método de ensayo para la medición de la reflectancia solar para superficies en campo usando un piranómetro (ver fotos 3 y 4). Es necesario áreas como círculos con al menos cuatro metros de diámetro o cuadrados con al menos cuatro metros de lado, y de poca pendiente. Mide tanto la energía incidente como la reflejada en W/m².

1.2. Criterios de diseños.-

Como se ha dicho, el objetivo es conseguir pavimentos asfálticos que reflejen la máxima energía posible de todo el espectro solar UV-VIS-IR. La reflexión del espectro visible, que representa el 43%, va a depender de la tonalidad o color, y el resto, UV e IR dependerá de las características físico-químicas de los componentes que forman los pavimentos.

Los criterios de diseño que se han estudiado son parámetros característicos de las mezclas asfálticas que pueden influir en la Reflectancia Solar-SR y a su vez en la temperatura superficial al incidir la radiación solar; a saber:

- Naturaleza mineralógica del árido: Calizo y pórfido.
- Material procedente de fresado-RAP.
- Tipo de ligante: Betún asfáltico negro convencional, y ligante sintético claro.
- Adiciones de pigmentos de óxidos metálicos de Fe, Cr y Ti.
- Granulometría de la mezcla: Continua y discontinua.
- Porosidad.
- Textura superficial: Tamaño máximo del árido.

1.2.1. Áridos.-

En las mezclas asfálticas los áridos representan un 95% del total de la mezcla, por lo tanto, sus características fotocolorimétricas van a ser determinantes para la obtención de una mezcla de alta reflectancia.

A priori los áridos de color claro van a ser más idóneos que los áridos de tonalidad oscura, pero con la medida del color sólo se va a tener información de la reflectancia del espectro visible, que es el 43% del espectro solar total, por lo que es importante obtener información de reflectancia de todo el espectro solar.

Se han seleccionado dos tipos de áridos para la comparativa de su reflectancia solar en todo el espectro, conforme a los requisitos marcados en el PG3 para las mezclas bituminosas de capas de rodadura:

- Árido calizo, “calcita” de origen mineralógico, proveniente de la Cantera Santa Rita VI – S tarmis, ubicada en Paraje de la Balonga, municipio de Abanilla (Murcia).

- Árido porfídico, “ofita” de origen mineralógico, muy utilizado por su coeficiente de pulido acelerado (CPA).

La medida de la reflectancia solar de dichos áridos seleccionados se ha realizado en un primer ensayo con piranómetro, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E1918, mediante el que se toman valores de le energía incidente y la reflejada colocado a una altura determinada. La proporción entre los dos datos resulta ser la SR del material a ensayo.

Mediante espectrofotometría UV-VIS-IR se puede obtener el valor de la reflectancia del espectro solar, así como los espectros UV-VIS-IR por separado, teniendo en cuenta que las longitudes de onda entre 250 - 400nm son las correspondientes al espectro Ultravioleta-UV; entre 400 - 700nm son las correspondientes al espectro Visible - VIS; y entre 700 - 2500nm son las correspondientes al espectro Infrarrojo - IR.

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E903 - 12 y utilizando la distribución espectral relativa normalizada de la radiación solar global contemplada en la norma ASTM G173 - 03(2012), obtenemos la reflectancia solar de los dos áridos.

Con los valores resultantes se ha realizado una representación gráfica como la mostrada en la **Figura 3**, que muestra como son las reflectancias en los distintos espectros de los dos tipos de árido: calizo y porfídico.

Los resultados de reflectancia obtenidos por los dos métodos de ensayo se resumen en la **Tabla 1**:

TABLA 1

Método de ensayo	Reflectancia solar - SR		
	Árido Calizo	Árido Porfídico	Objetivo proyecto
Espectrómetro ASTM E903-12	62	20	33
Piranómetro ASTME1918	58	18	

Los resultados obtenidos por los dos métodos revelan que los áridos calizos, con una SR entre 58-62, son óptimos para la fabricación de mezclas reflectantes, pero los pórfidos, con un valor de SR entre 18-20, a priori, fabricando mezclas con ellos, no dan resultados óptimos de reflectancia.

Se observa también que los resultados obtenidos por los dos métodos son equivalentes, lo que es importante para validar el proceso de diseño de las mezclas en el laboratorio, ya que los valores que se obtengan en el laboratorio se pueden extrapolar a las mezclas fabricadas y extendidas.

1.2.2. Material procedente fresado-RAP.-

Otro material que va a ser estudiado para determinar su utilidad en el desarrollo de mezclas reflectantes, es el material de reciclado, procedente de fresado de firmes de asfaltos (RAP).

Para ello se han tomado muestras de un fresado realizado en la zona del sureste de España, concretamente en la carretera de Monteagudo-Abanilla de la Región de Murcia. La mezcla fresada corresponde a una tipo AC16 SURF S.

Se han realizado medidas de reflectancia mediante espectrofotometría y colorimetría, obteniéndose los resultados mostrados en la **Tabla 2**:

TABLA 2

% REFLENTANCIA	Espectrofotometría ASTM E903-12	Colorimetría UNE-EN 11664	OBJETIVO PROYECTO
ULTRAVIOLETA	7		
VISIBLE	5	8	
INFRARROJO	11		
REFLECTANCIA SOLAR - SR	9		33

Se aprecia valores de SR muy por debajo de lo marcado en el objetivo del proyecto. Previsiblemente la tasa de material reciclado procedente de asfalto fresado (RAP) que se pueda utilizar para el desarrollo de mezclas reflectantes será baja, no superior del 25%.

1.2.3. Ligantes.-

Para las mezclas reflectantes, se ha seleccionado un ligante sintético que proporciona a las mezclas reflectantes una menor tonalidad oscura, pero sin menoscabar las prestaciones mecánicas necesarias para su uso en firmes urbanos.

Este ligante sintético está compuesto por una mezcla de resinas, aceites, polímeros y ceras Fischer-Tropsch. Cada componente confiere una característica específica que le inculcará a las mezclas unas prestaciones determinadas. Las resinas aumentan la adhesividad, los aceites le confiere al ligante efectos dispersantes, los polímeros elasticidad y resistencia y las ceras modifican la viscosidad.

La caracterización se ha realizado teniendo en cuenta los ensayos reflejados en los Artículos 211 (betunes de pavimentación), 212 (betunes modificados con polímeros) del PG3.

También se ha realizado la caracterización de betunes asfálticos tanto de penetración (35/50) como modificados con polímeros PMB 45/80-65 que se utilizan en las mezclas asfálticas convencionales, ya que van a ser utilizados en la fabricación de las mezclas control que se compararán con las mezclas reflectantes desarrolladas.

Los valores resultantes de los ensayos de caracterización de estos ligantes se recogen en la **Tabla 3**:

TABLA 3

CARACTERIZACIÓN	UNIDAD	NORMA	LIGANTE		
			35/50	PMB 45/80-65	LIGANTE SINTÉTICO
Determinación de la penetración	1/10mm	EN 1426	39	55	46
Punto de reblandecimiento	ºC	EN 1427	53,7	75	70
Índice de penetración		EN 12591 anex A	-0,9	3,9	2,6
Fragilidad Frass	ºC	EN 12593	-6	-16	-8
Recuperación elástica	ºC	NLT-329		82	64
Temperatura de mezcla	ºC		150-160	160-170	150-160
Temperatura de compactación	ºC		140-150	155-165	140-150

Al igual que a los áridos también se ha realizado a los ligantes el estudio espectrofotométrico mediante el ensayo de la norma ASTM E903-12, obteniendo los valores y gráficas de reflectancia solar-SR mostrados en la **Tabla 4** y **Figura 4**.

Con estos resultados, será necesario el uso de un ligante sintético de tonalidad clara para obtener la reflectancia solar objetivo

TABLA 4

Método de ensayo	Reflectancia solar - SR		
	Betún 35/50	Ligante sintético	Objetivo proyecto
Espectrómetro ASTM E903-12	8	17	33

1.2.4. Adiciones de pigmentos de óxidos metálicos.-.

La adición en las mezclas asfálticas de pigmentos de óxidos metálicos va a ayudar a conseguir tonalidades claras para obtener buena reflectancia del espectro visible, pero también pueden ayudar a aumentar la reflectancia del IR por sus características físico-químicas.

Los pigmentos estudiados son los que se usan comúnmente en la construcción:

- Óxidos de hierro amarillos y rojos.
- Óxido de cromo verde.
- Óxido de titanio blanco.
- Azul de Ultramar. Polisulfuro de silicatos complejos.

Para comprobar cómo actúan los pigmentos sobre la reflectancia solar en una mezcla asfáltica se han realizado muestras en laboratorio con árido fino calizo, ligante y los distintos tipos de pigmentos, y a continuación se han obtenido mediante el espectrofotómetro (ASTM E903-12) los valores de reflectancia de los tres espectros UV-VIS-IR.

Primeramente se ha utilizado como ligante betún asfáltico negro 35/50**,** realizándose muestras con todos los pigmentos seleccionados. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 5** y **Figura 5**

TABLA 5

MATERIAL	BETÚN-LIGANTE	PIGMENTO %	UV	VIS	IR	SR
Placa árido calizo 0,063/1mm	Betún 35/50	Sin pigmento	7	5	11	8
		Ox. Fe amarillo 3%	7	6	15	11
		Ox. Fe rojo 3%	8	6	21	14
		Azul de Ultramar 3%	9	6	9	8
		Ox. Cromo 3%	7	6	19	13
		Ox. Titanio 3%	7	8	22	15

Se aprecia que algunos pigmentos de óxidos metálicos pueden aumentar la reflectancia del IR más de un 80%, siendo los óxidos de hierro rojo y óxidos de titanio los que mejor se comportan, en éste último también es representativo el aumento de la reflectancia del visible. En todo caso, con la utilización en mezclas asfálticas de ligante bituminoso negro y los pigmentos estudiados no es posible obtener una reflectancia solar- SR mayor o igual al objetivo 33 % (0,3).

A continuación se han realizado distintas muestras usando ligante sintético claro con el mismo árido calizo. Los pigmentos utilizados han sido óxido de hierro rojo y óxido de titanio, ya que a priori son los que mejor comportamiento van a tener para el objetivo marcado. Los porcentajes de pigmento han sido muy inferiores a los utilizados con betún negro.

Se han obtenido mediante el espectrofotómetro (ASTM E903-12) los valores de reflectancia de los tres espectros UVVIS-IR. Ver **Tabla 6** y gráficos de las **Figura 6 y 7**.

TABLA 6

Referencia	3	27	23	28	29	34
Material	Placa árido calizo 0,063/1mm					
Betún-ligante	Ligante sintético					
Pigmento %	Sin pigmento	Ox.Titanio x%	Ox.Fe rojo x%	(Ox. Titanio + Ox. de Hierro) x%		
Reflect. Uv	9	8	8	9	8	9
Reflect. Vis	28	52	12	25	36	28
Reflect. Ir	37	53	38	43	48	46
Reflect. Sr	32	51	25	34	41	37

En los resultados se aprecia que las reflectancias del espectro de IR en las muestras con pigmentos son mayores que en la muestra sin pigmento, aunque esta muestra tenga valores de reflectancia del espectro visible iguales o mayores. Por ejemplo, la muestra sin pigmento 3 y la muestra con pigmentos 34 tienen la misma reflectancia visible, son iguales a la visión humana, por lo tanto en base solo a la tonalidad se tendrían la misma reflectancia solar; sin embargo la muestra 34 tiene más reflectancia en el IR (que es invisible), dando en el cómputo final una mayor reflectancia solar con respecto a la muestra sin pigmentar. La muestra (28) tiene la reflectancia del visible inferior a la mezcla sin pigmento 3 pero la reflectancia total es superior en la muestra 28 ya que ha aumentado la reflectancia del infrarrojo.

Este experimento demuestra que la adición de algunos pigmentos de óxidos metálicos puede aumentar la reflectancia del espectro infrarrojo, haciendo la superficie más reflectante a la energía solar donde se ha adicionado el pigmento.

Por tanto, puede concluirse que, a priori, para obtener una mezcla asfáltica de reflectancia solar superior al 33% se debe utilizar un ligante sintético pigmentado con óxido de titanio, y que se puede matizar la tonalidad clara obtenida con el pigmento de TiO_2 con un pequeño porcentaje de óxido de hierro rebajando la reflectancia del visible sin menoscabar en gran medida la reflectancia solar.

1.2.5. Textura y porosidad.-

A priori ya se sabe qué tipo de materiales debemos de utilizar para conseguir la reflectancia solar marcada como objetivo, según los valores espectrofotométricos que tienen dichos materiales. Pero también hay una característica geométrica de las superficies que va a influir en el comportamiento térmico de la radiación solar incidente, y es como se refleja dicha radiación.

La reflexión de las ondas electromagnéticas procedentes del sol que inciden en una superficie puede ser de dos tipos diferentes: (1) Reflexión especular, donde la luz se refleja sobre una superficie como un espejo. Estas superficies están normalmente pulimentadas; y (2) Reflexión difusa, donde la luz se refleja sobre una superficie rugosa y los rayos salen rebotados en todas direcciones. La forma y el camino de propagación de la energía solar van a influir en el calentamiento de la superficie; cuanto más reboten las ondas más se va a calentar la superficie, por lo tanto según el tipo de reflexión el calentamiento de las superficies puede ser distinto.

En la **Figura 8** se ve el detalle de la reflexión de la radiación solar incidente y como refleja y rebota en las superficies, haciendo que los áridos se calienten, para tres tipos de superficies: (a) lisa - AC; (b) rugosa - BBTM-11A; y (c) porosa - BBTM-11B.

Dentro del catálogo de firmes para capa de rodadura existen tipos de mezclas más o menos rugosas, con más o menos huecos, y estos huecos con más o menos tortuosidad.

Para comprobar cómo influyen estas características en la temperatura superficial se han expuesto a la acción de la radiación solar muestras de varias mezclas con betunes asfálticos y con reflectancias solares similares (valores de SR entre 7-8 % (0,07-0,08)) y distintas granulometrías, huecos y macrotextura. Todas ellas al estar fabricadas con betunes negros y previsiblemente van a tener la misma reflectancia solar, por lo tanto cualquier diferencia de temperatura en la superficie al estar expuestas a la radiación solar será debido a otra característica.

Las mezclas asfálticas y sus características que se han estudiado son las siguientes:

- BBTM 11B. Granulometría discontinua, alta rugosidad y elevado valor de huecos
- BBTM 11A. Granulometría discontinua, alta rugosidad y pocos huecos
- AC16 SURF S. Granulometría semidensa, baja rugosidad y pocos huecos
- AC22 BIN S. Granulometría semidensa, baja rugosidad y elevado valor de huecos
- AC16 SURF D. Granulometría densa, baja rugosidad y pocos huecos

En la **Tabla 7** se expresa los valores de reflectancia, porosidad y rugosidad de cada una de las mezclas a ensayar., con una reflectancia solar parecida para todas ellas.

TABLA 7

Ref.	Tipo de Mezcla	Reflectancia Solar SR	% Huecos	Macrotextura MPT
1	BBTM–11B	8	16	2,4
2	BBTM–11A	8	5,2	1,6
3	AC16–S	7	5,1	0,8
4	AC22-D	8	7,3	0,8
5	AC16-D	7	4,8	0,7

La exposición (ver Foto 7) se realizó un día despejado con una radiación solar máxima de 890 w/m². Se obtuvieron valores de temperatura cada hora desde las 9 h. hasta 18h. Las medidas de temperatura se realizaron tomando imágenes de toda superficie de cada muestra con cámara termográfica (ver foto 8) que mediante un programa informático calcula la temperatura máxima, mínima, y media de dicha superficie. Es el método que se ha utilizado para medir temperaturas superficiales durante todo el estudio.

La gráfica de la **Figura 9** muestra la evolución de la temperatura superficial a la exposición de la radiación solar

Según los valores de temperatura media de cada superficie obtenidos en las muestras expuestas, se puede tener una diferencia de temperatura de 5 ºC entre la mezcla más caliente (BBTM-11B) y la más fría (AC16 D), observándose que una superficie de una mezcla bituminosa con los mínimos huecos, granulometría densa, baja macrotextura y

tamaño máximo reducido de áridos, ayuda a que se mantenga la temperatura superficial más baja.

Se ha visto que la porosidad y la macrotextura influyen en el calentamiento de una superficie, pero también es importante saber cómo influyen estos parámetros en el proceso de enfriamiento, es decir, la evolución de la temperatura superficial a la exposición de la radiación solar. Interesa particularmente saber si las diferencias de temperatura entre dos superficies al calentarse, se mantienen cuando se enfrían.

Para ello se sometieron muestras de 30x40 cm de mezcla BBTM-11B y AC16 D a la intemperie durante 48 horas, así como sondas termográficas de contacto para tomar datos de temperatura cada 15 min y se almacenaron los datos en un registrador Datalogger. A continuación se muestran los datos obtenidos son los mostrados en gráfico de la **Figura 10**.

Se aprecia que la velocidad de enfriamiento es similar en las dos mezclas, lo que implica que la macrotextura y porosidad no influye en la velocidad de enfriamiento. También se observa que la mezcla tipo AC16-D se mantiene más fría durante todo el proceso de calentamiento y enfriamiento. Esto quiere decir que las superficies reflectantes están actuando durante todo el ciclo solar rebajando la temperatura superficial.

1.3. Conclusiones.-

Después del proceso de investigación realizado, las conclusiones obtenidas sobre los criterios de diseños más favorables para mezclas asfálticas tipo AC y BBTM con propiedades de alta reflectancia solar, son las siguientes:

- Las mezclas con áridos calizos son más reflectantes que las mezclas con árido porfídico.

- Las mezclas con granulometría continua (AC tipo D y S) son más reflectantes que las mezclas de granulometría discontinua (BBTM tipo A y B), siendo la velocidad de enfriamiento similar.

- El menor tamaño máximo de los áridos es más favorable para la reflectancia que un tamaño mayor. Tamaño máximo: 16 (AC); 8 (BBTM)

- Cuantos menos huecos tenga la mezcla, más reflectante será.

- El uso de ligante sintético claro es necesario para la obtención de pavimentos reflectantes.

- Adicionando algunos pigmentos de óxidos metálicos, la reflectancia del IR aumenta un 80% con respecto a la muestra control, sin cambiar prácticamente la reflectancia del visible.

- Los pigmentos que mejor funcionan son los óxidos de titanio (blanco), preferentemente TiO2, y los óxidos de hierro rojo y amarillo. El mayor porcentaje del pigmento utilizado puede influir positivamente.

- Con la utilización de ligante sintético y TiO2 se consiguen mezclas asfálticas tipo AC o BBTM con valores de SR alrededor de 50%.

En la **Tabla 8**, se resumen los criterios más favorables y desfavorables para diseñar una mezcla que vaya a tener, a priori, propiedades de alta reflectancia solar, y con ello conseguir una temperatura superficial los más baja posible. Estos criterios son el tipo de ligante, de áridos, tipo de mezcla, granulometría y tamaño máximo de árido.

TABLA 8

Tendencia	Ligante	Áridos	Tipo Mezcla	Granulometría	T. Máximo
Favorable	Ligante sintético	Claros	AC BBTM	D A	<16mm <8mm
Desfavorable	Betún Negro	Pórfido	BBTM; PA	5 (AC); B (BBTM)	22 (AC); 11 (BBTM)

En resumen: Las mezclas con áridos claros, granulometría continua, pocos huecos y menor tamaño de árido son más reflectante. Si a esto se añade ligante sintético y TiO2 obtenemos pavimentos reflectantes con un SR de 50.

2. Definición de las fórmulas de trabajo de las mezclas idóneas; estudio de su comportamiento y funcionalidad.-

En base a los criterios de diseño definidos para el tipo y composición de mezclas de alta reflectancia, se han desarrollado mezclas bituminosas en caliente con índice SR optimizado

para diferentes solicitaciones, verificando las propiedades esperadas mediante el estudio de su comportamiento y funcionalidad.

En la definición del protocolo de fabricación de dichas mezclas se ha validado el cumplimiento de la normativa correspondiente mediante la realización de diversos ensayos de laboratorio.

2.1. Mezclas asfálticas reflectantes.-

Se han fabricado mezclas asfálticas normalizadas en el laboratorio teniendo en cuenta las consideraciones de diseño señaladas en los apartados anteriores. Con el material obtenido se han elaborado probetas para comprobar la reflectancias solares que se obtienen, así como su comportamiento térmico frente a la radiación solar.

Para la elaboración de las distintas muestras se han utilizado áridos gruesos y finos calizos, los dos tipos de ligante: betún 35/50 y ligante sintético, y se han realizado mezclas con pigmento y sin pigmento. También se ha fabricado mezclas con ligante sintético, óxido de titanio y 10% de RAP para comprobar el comportamiento de la adición de material reciclado. Todas las mezclas han sido del tipo AC16 SURF D, salvo una de referencia BBTM11 B.

Los porcentajes de áridos y ligante han sido para todas las mezclas iguales. En la **Tabla 9** se expone la fórmula de trabajo para AC16 D, en porcentajes de áridos/ligante, y en la **Figura 11** el huso granulométrico

Se ha utilizado una mezcladora de laboratorio para fabricar las muestras mediante la norma UNE-EN 12697-35.

TABLA 9

MATERIAL	FRACCIÓN	PORCENTAJE - %
Árido Calizo	12/20	32
Árido Calizo	6/12	34
Árido Calizo	0/4	24
Árido Calizo	Filler	5
Ligante / mezcla		5,0

El ligante sintético utilizado se ha dosificado en la mezcla directamente sobre la mezcladora. La relación ponderal polvo mineral/ligante no debe ser superior al valor 1,1; contabilizándose, en su caso, el pigmento empleado como polvo mineral. La dotación de ligante ha sido de 5,0% en masa sobre el total de la mezcla. La dosificación de pigmento oscila entre 1,0 y 2,0% en masa sobre el total de la mezcla.

2.1.1. Comportamiento térmico frente a radiación solar.-

Para poder comprobar el comportamiento de las muestras a la exposición de las radiaciones solares y medir las reflectancias solares, se han fabricado probetas rectangulares con compactadora de rodillos según norma UNE-EN 12697-33, y probetas cilíndricas con la compactadora de impactos según norma UNE-EN 12697-30.

En la **Tabla 10** se exponen los valores obtenidos de reflectancias de los espectros solares mediante el espectrofotómetro según la norma ASTM E903-12.

Se aprecia que la única mezcla que cumpliría el objetivo de SR a conseguir una SR ≥ 33 (0,3) es la fabricada con ligante sintético de óxido de titanio. La mezcla con ligante sintético sin pigmentar no llega al valor umbral. También se observa, según los resultados, que la adición de material reciclado - RAP de un 10% influye muy negativamente la reflectancia, bajando el valor a la mitad.

Estas mismas muestras se dejaron a la intemperie, expuestas a la acción de la radiación solar, midiendo la temperatura superficial cada hora mediante cámara termográfica. Los valores se obtuvieron a temperatura ambiente máxima de 37ºC una radiación solar máxima de 885 W/m².

El gráfico de la **Figura 12** muestra curvas de evolución de la temperatura superficial a la exposición de la radiación solar para todas las muestras

De los resultados obtenidos se observa que entre dos muestras de mezcla AC16 D, una con betún negro 35/50 y la otra con ligante sintético y TiO_2, hay una diferencia máxima de temperatura superficial de 10ºC, y en el caso que la muestra con betún negro sea del tipo BBTM-11B la diferencia aumenta a 13ºC, de modo que cuanto mayor es el valor de reflectancia en las muestras, menor es la temperatura en la superficie.

En el gráfico de barras de la **Figura 13** muestra las temperaturas máximas alcanzadas por las muestras, y el de la **Figura 14**, la disminución de la temperatura en relación a la superficie más caliente

Con los valores obtenidos se ha realizado el gráfico de tendencia de la **Figura 15**, que muestra la previsión de disminución de temperatura con el incremento de SR en un pavimento.

TABLA 10

Tipo de mezcla	Tipo Betún-Pigmento	Reflectancia VIS	Reflectancia IR	Reflectancia SR
BBTM-11B	45/80-65	5	9	7
AC16 35/50 D	35/50	6	9	8
AC16 35/50 D	Ligante sintético-sin pigmento	18	38	28
AC16 35/50 D	Ligante sintético + TiO_2	52	52	50
AC16 35/50 D	Ligante sintético + Fe_2O_2	11	42	27
AC16 35/50 D	Ligante sintético + TiO_2 + 10% RAP	17	33	25

Se puede afirmar que partiendo de un valor determinado de reflectancia solar en un firme convencional, cada 5% de aumento de SR por la acción de una mezcla reflectante, la temperatura superficial bajará 1ºC aproximadamente.

Se han realizado exposiciones con las indicadas muestras rectangulares y cilíndricas en diferentes días con temperaturas ambientes máximas que oscilan desde 18 a 44ºC, y se ha observado que la diferencia se mantiene en 10ºC sin depender de la temperatura ambiente, variando solamente la temperatura máxima alcanzada en la superficie. Comprobando otros parámetros meteorológicos de esos días, se ha observado que los valores de radiación solar en los días que la diferencia máxima oscilaba alrededor de 10ºC son similares, y solamente cuando baja el valor de radiación, disminuye también la diferencia de temperatura. Esto nos lleva a la conclusión favorable de que en periodo invernal la diferencia de temperatura entre el asfalto convencional y el reflectante será mucho menor.

En la **Tabla 11** se exponen los valores más representativos obtenidos en distintas exposiciones a la radiación solar realizadas a muestras de firmes convencionales y reflectantes en la región de Murcia (ver Tabla 8). También se detalla la realización de una exposición a probetas circulares observándose la diferencia de 10ºC entre la mezcla convencional con betún negro y la mezcla reflectante con ligante sintético y óxido de titanio.

TABLA 11

Exposición de muestras a la radiación solar. Murcia				
Fecha	**Temperatura ambiental máx.**	**Temperatura máx. AC16 35/50**	Max. diferencia firme convencional - firme reflectante	Radiación máxima w/m^2
12/01/2017	18,0	39,7	8,4	520
11/11/2016	21,5	45,6	9,4	645
14/10/2016	24,0	44,5	9,4	910
27/10/2016	25,0	48,5	9,5	680
15/09/2016	28,5	54,2	9,7	865
11/10/2016	30,9	49,4	9,3	730
16/09/2016	30,4	55,8	9,5	890
06/07/2016	37,0	61,5	10,3	885
05/09/2016	44,0	69,1	10,3	895
19/10/2016 Alta nubosidad	22,0	30,5	3,0	320

También se ha comprobado que ésta diferencia de 10ºC se mantiene a distintas temperaturas ambientes entre 18 a 44ºC si el valor de la energía solar incidente es superior a 600 W/m². Conforme disminuye el valor de la energía incidente de este valor umbral, va disminuyendo la diferencia de temperatura entre las superficies convencionales y reflectantes.

2.1.2. Comportamiento térmico durante el proceso de enfriamiento en relación con pavimentos asfalticos convencionales.-

Interesa también saber si las diferencias de temperatura entre la superficie de un firme convencional y la de un firme reflectante se mantienen en todo ciclo solar. Se ha visto que conforme aumenta la radiación solar aumenta la diferencia de temperatura entre las dos

superficies, pero no sabemos la velocidad de enfriamiento cuando baje la radiación a lo largo de la tarde-noche.

Para ello se han colocado muestras de 30x40 cm de las mezclas AC16 35-50 D y AC16 LIG. SINT. D + TiO2 a la intemperie durante 24 horas, con sondas termográficas de contacto para tomar datos de temperatura cada 15 min, y se han almacenado los datos en un registrador Datalogger. La evolución de la temperatura superficial resultante es la mostrada en el gráfico de la **Figura 16**.

Se comprueba que la superficie de la mezcla AC16 D con ligante sintético y TiO2 siempre está más fría que la superficie de la mezcla AC16 D con betún negro, ayudando a rebajar la temperatura ambiente y así mitigar el efecto de isla de calor.

Pude concluirse, por tanto, que las mezclas reflectantes en el proceso calentamiento-enfriamiento se mantienen más frías que las mezclas convencionales, por lo que podrán ser más duraderas por soportar temperaturas inferiores.

Frente a pavimentos asfalticos usados.-

Cuando se plante sustituir un firme convencional por otro reflectante, sabemos cuál va ser la ventaja térmica superficial partiendo de un firme convencional nuevo o recién extendido, pero no sabemos cuál sería la ventaja o diferencia de temperatura en relación a un firme asfaltico usado. Tendíamos que saber la reflectancia de partida del firme usado.

Según datos bibliográficos, la reflectancia de un firme asfáltico convencional varía con el paso del tiempo; recién extendido oscila entre 5-10 y envejecido puede dar valores entre 10-15.

Mediante el pirómetro se ha considerado oportuno comprobar estos valores, realizando medidas de reflectancia solar a firmes asfálticos con distintas antigüedades y distintos áridos. También se han realizado medidas de reflectancia del visible con el colorímetro

Los valores resultantes de SR en el espectro solar y visible para un vial de asfalto recién extendido y de diferentes años de antigüedad, se recogen en la Tabla 12.

A partir de estos valores se puede realizar un gráfico de tendencia para predecir la reflectancia de un firme asfáltico al paso de los años, como el mostrado en la **Figura 17**.

Se confirma la conclusión anterior de que cada 5% de aumento de la reflectancia solar obtenido al cambiar un firme convencional por otro reflectante se puede bajar la temperatura superficial en 1ºC, de modo que, sabiendo la reflectancia solar del firme a sustituir podemos predecir la bajada de temperatura superficial que se obtenga.

TABLA 12

Firme asfaltico		
Años de antigüedad	VR	SR
Recién extendido	3	6
1	6	8
3	7	9
10	9	13
15	13	16

2.2. Mezclas asfálticas reflectantes con propiedades antideslizantes.-

El tipo de mezclas diseñados como más idóneas para el objetivo de reflectancia marcado, que son mezclas del tipo AC 16 SURF D con ligante sintético, óxido de titanio y árido calizos, al ir a la zona de rodadura del firme deberán tener unas mínimas propiedades antideslizantes. Puesto que los áridos porfídicos tienen mejores prestaciones antideslizantes que los áridos calizos, se han realizado mezclas reflectantes cambiando parte de los áridos calizos por porfídicos y se ha estudiado su comportamiento térmico y reflectante.

Se han fabricado y comprobado su comportamiento reflectante las siguientes mezclas:

- A: Mezcla AC16 con ligante sintético +TiO2 con áridos gruesos y finos porfídicos
- B: Mezcla AC16 con ligante sintético +TiO2 con áridos gruesos porfídicos y finos calizos
- C: Mezcla AC16 con ligante sintético +TiO2 con áridos gruesos y finos calizos
- D: Mezcla AC16 con betún negro con áridos gruesos porfídicos y finos calizos

En las tres primeras mezclas (A, B y C) se ha utilizado el mismo ligante y TiO2, solamente cambia el tipo de áridos. La primera (A) está fabricada con todos los áridos porfídicos. En la segunda (B) los áridos gruesos de la mezcla, que representan el 50%, son áridos porfídicos

y los áridos finos calizos. La mezcla (C) está fabricada con áridos calizos. La mezcla (D) es el tipo de mezcla convencional fabricada con betún negro, áridos gruesos porfídicos y áridos finos calizos.

Los valores de reflectancia solar SR obtenidos mediante espectrofotometría según norma ASTM E903-12 se recogen en la **Tabla 13**.

TABLA 13

Reflectancia solar			
Tipo de Mezcla			
A	B	C	D
26	45	50	6

A la vista de estos resultados se comprueba que la mezcla en la cual se ha sustituido todo el árido calizo por porfídico (A) la reflectancia baja a la mitad y no llega al valor de SR = 33 marcado como objetivo. Sin embargo, para la muestra (B) donde solo se ha sustituido el árido grueso de calizo a porfídico, se obtienen un valor de SR aceptable.

Para comprobar el comportamiento a la acción de la energía solar de cada las mezclas, se realizó una exposición al solar (14/10/2016) a una temperatura ambiente de 24ºC y una reflectancia solar incidente máxima de 910 w/m². El gráfico de barras de la **Figura 18** muestra los valores de temperaturas máximas alcanzados, siendo la mezcla B la que alcanza una temperatura entre las dos más bajas.

2.3. Mezclas asfálticas reflectantes de capa fina de rodadura.-

En principio se puede afirmar que las mezclas reflectantes diseñadas tienen precio más elevado que las mezclas convencionales. Una manera de compensar este aumento de coste es diseñar mezclas que para su aplicación necesiten el menor espesor posible. Dentro del catálogo de firmes que se exponen en el PG-3 la mezcla más idónea para comprobar su comportamiento al ser sustituida por la mezcla tipo AC16 SURF D, sería la de tipo BBTM-8A.

Se ha estudiado entonces el comportamiento térmico y reflectante de una mezcla de tipo BBTM-8A con todos los áridos calizos, y de otra sustituyendo los áridos calizos gruesos por

árido porfídico, y se ha realizado la comparativa con la mezcla AC16 D, con ligante sintético y TiO2. Los valores de reflectancia solar obtenidos son los mostrados en la **Tabla 14**.

TABLA 14

Reflectancia solar			
Tipo de Mezcla			
AC16 D 35/50	AC16 D CALIZO	BBTM-8A CALIZO	BBTM-8A PORFIDIO (AG)
6	50	42	38

Los valores obtenidos con las mezclas BBTM-8A son aceptables, aunque los valores son menores que los de las mezclas tipo AC16 D.

Con fecha 11/11/2016 se realizó la exposición a la radiación solar y se midieron las temperaturas máximas alcanzadas por estas mezclas de capa fina. La temperatura ambiental máxima fue de 21ºC y la radiación solar máxima de 645 w/m². En la **Figura 19** de presenta el gráfico de temperaturas máximas resultante.

2.3.1. Estudio del comportamiento y funcionalidad de la mezcla BBTM 5A.-

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio y posterior fabricación en planta en el proceso de diseño de una mezcla asfáltica tipo BBTM 5A para obtener un pavimento que mitigue el efecto isla de calor según la certificación LEED v4 BD+C, siendo el valor de la Reflectancia Solar - SR a conseguir igual o superior a 33, exigido por dicha certificación para ser catalogado como superficie reflectante.

Se ha decidido estudiar la mezcla BBTM 5A para poder ajustar los costes debidos al ligante sintético y el TiO2 en cuanto al espesor utilizado, de solo 2 cm, en comparación con la mezclas AC16D que se necesitarían de unos 4 cm mínimo; y también pensando que la puesta en obra será en calles sobre todo de Ayuntamientos. Todos los resultados son de mezcla fabricada en planta.

Una vez estudiado los distintos parámetros característicos de dicho tipo de mezclas asfálticas que van a influir en la Reflectancia Solar-SR y a su vez en la temperatura

superficial al incidir la radiación solar, pasamos a estudiar su comportamiento mecánico, físico (SR) y funcional.

2.3.1.1. Fabricación en planta y puesta en obra.-

La fabricación de las mezclas se ha realizado en una planta discontinua marca Marini de 220 Tn/h (ver foto 1), con la precaución de una buena limpieza previa de restos de betún convencional en todos los dispositivos para evitar contaminación.

Se ha fabricado mezcla BBTM 5A con betún 35/50, y mezcla BBTM 5A con ligante sintético y TiO_2, dentro de los rangos de dosificación y dotación de ligante sintético preestablecido para este tipo de mezclas BBTM A.

El extendido de la mezcla reflectante se hizo de forma convencional con extendedora, y la compactación se llevó a cabo con rodillo metálico, siguiendo las mismas pautas que para una mezcla convencional. No obstante, en evitación de contaminaciones previamente se limpiaron todos los dispositivos de las máquinas, y el personal utilizó botas de seguridad sin restos de mezcla y utensilios de mano (palas, rastrillos, etc.) bien limpios.

2.3.1.2. Características mecánicas.-

La mezcla objeto de estudio es la BBTM 5A, con la curva granulometría según UNE-EN 12697 2 representada en la gráfica de la **Figura 20**, y un contenido de betún sobre mezcla del 5.0 %, y una relación F/BA en torno a 1.3.

Los valores volumétricos, según UNE-EN 12697-6 y UNE-EN 12697-8, son los indicados en la **Tabla 15**.

TABLA 15

UNE-EN 12697-6 UNE-EN 13697-8	BBTM 5A Convencional	BBTM 5A Reflectante	Tolerancia
Densidad (kg/m^3)	2401	2414	--
VMA (%)	16,7	16,2	--
Vm (%)	5,1	4,6	≥ 4

Tracción Indirecta y Sensibilidad al agua:

Los resultados de los ensayos de tracción indirecta y sensibilidad al agua, según UNE-EN 12697-12, son los indicados en la **Tabla 16**.

TABLA 16

UNE-EN 12697-12	BBTM 5A Convencional	BBTM 5A Reflectante	Tolerancia
ITSd (kPa)	2084	1920	--
ITSR (%)	92,6	91,9	≥ 90

Estabilidad:

Se ha realizado el ensayo Marshall según norma UNE-EN 12697-34, obteniéndose valores de estabilidad y deformación indicados en la **Tabla 17**.

TABLA 17

UNE-EN 12697-34	BBTM 5A	BBTM 5A	Tolerancia
	Convencional	Reflectante	
Estabilidad (KN)	16,6	12,2	--
Deformación (mm)	2,11	4,47	--

Resistencia a las deformaciones plásticas:

Para obtener los datos de deformaciones plásticas se han realizado los ensayos de rodadura según UNE-EN 12697-22, obteniéndose los resultados de la **Tabla 18**.

TABLA 18

UNE-EN 12697-22	BBTM 5A Convencional	BBTM 5A Reflectante	Tolerancia
WTS aire	0,03	0,008	0,07
PRD	3,9	0,9	5

Resistencia al deslizamiento:

Para obtener valores de resistencia al deslizamiento en los tramos extendidos con las amasadas fabricadas tanto de la mezcla convencional como la mezcla reflectante, se ha realizado el ensayo según norma UNE-EN 13036-4, con la cual se han obtenido valores del ensayo del péndulo de fricción - PTV indicados en la **Tabla 19**. Los valores obtenidos en los dos pavimentos son similares y satisfactorios.

TABLA 19

UNE-EN 13036-4	BBTM 5A Convencional	BBTM 5A Reflectante	Tolerancia
PVT	96	97	--

Macrotextura:

Para obtener valores de macrotextura superficial en los tramos extendidos con las amasadas fabricadas tanto de la mezcla convencional como la mezcla reflectante, se ha realizado el ensayo según norma UNE-EN 13036-1. Los valores obtenidos para ambos pavimentos, mostrados en la **Tabla 20**, son también similares y satisfactorios.

TABLA 20

UNE-EN 13036-1	BBTM 5A Convencional	BBTM 5A Reflectante	Tolerancia
MTD	1,1	1,2	≥ 1,1

2.3.1.3. Reflectancia solar - SR.-

Para la obtención de la reflectancia solar de una superficie se ha utilizado la norma ASTM E1918-06 mediante el uso de un piranómetro, en la cual se describe el método ensayo para superficies horizontales con poca pendiente. Tras el ensayo se aprecia que la superficie con mezcla convencional tiene una reflectancia-SR de 7% y en la mezcla reflectante la SR es de 40%, muy por encima. En la **Tabla 21** se recogen estos valores.

TABLA 21

ASTM E1918-06	BBTM 5A Convencional	BBTM 5A Reflectante	Valor pavimento reflectante-LEED
SR	7	40	33

2.3.1.4. Aspectos funcionales.-

Paralelamente a los ensayos para ver el comportamiento mecánico de los pavimentos reflectantes, se han realizado los siguientes estudios para comprobar aspectos que pueden ser importantes para la funcionalidad de estos pavimentos.

Temperatura superficial e interna:

Se ha verificado si la diferencia de temperatura superficial que puede existir entre un pavimento asfáltico convencional y otro pavimento reflectante expuesto a la radiación solar, existe también en el interior de la mezcla, con la ventaja sobre la durabilidad del pavimento que esto podría revertir.

Para ello se han medido las temperaturas superficiales y a 2 cm de profundidad a dos muestras, una de pavimento asfáltico convencional y otra de reflectante mediante la exposición a la energía solar en la intemperie con una temperatura ambiental de 36ºC y radiación de 950 w/m², observándose que la diferencia que se experimenta en la superficie también se observa en el interior, por lo tanto los pavimentos reflectantes van soportar menos temperatura interior que los pavimentos asfálticos convencionales. Esta diferencia puede ser de hasta 10ºC.

Comportamiento de la mezcla a la intemperie:

En los pavimentos reflectantes, la reflectancia del espectro visible es aproximadamente un 50% de la reflectancia solar total. Valores de reflectancia del espectro visible alta depende de las tonalidades claras de los pavimentos, de modo que en el caso que se oscurezca el pavimento por estar expuesto a la intemperie, bajaría la reflectancia perdiendo efectividad. A continuación se expone la variación del color del pavimento reflectante diseñado expuesto a la intemperie durante 10 meses.

Para comprobar si la tonalidad del pavimento reflectante cambia por la acción de la exposición a la intemperie, se ha colocado una probeta del pavimento reflectante en el exterior y se ha medido la reflectancia del visible y las coordenadas colorimétricas sistema CIELAB (L*, a* y b*) mediante colorímetro diferencial desde el inicio hasta 10 meses trascurridos (ver foto 14-Probeta de mezcla reflectante a la intemperie tabla 9). Las reflectancias y valores CIELAB resultantes son los indicados en la **Tabla 22**.

Se aprecia que la probeta del pavimento reflectante expuesta a la intemperie cambia a tonalidades más claras (aumenta el valor de L*) y menos amarillas (disminuye la coordenada b*), aumentado la reflectancia del visible. Esta peculiaridad va a ayudar a mantener el rendimiento de los pavimentos reflectantes.

TABLA 22

Característica colorimétrica		Valores Iniciales	Valores 5 meses	Valores 8 meses	Valores 10 meses
Reflectancia visible		45	46	50	51
Valores CIELab	L*	74,22	74,49	77,08	77,35
	a*	1,13	1,33	0,95	0,92
	b*	12,47	9,49	7,60	7,61

Mezclas reflectantes y los rayos UV:

Otro aspecto que se ha estudiado de la funcionalidad de los pavimentos reflectantes es el relacionado con la salud. En el espectro solar, la energía de longitud de onda en el rango Ultravioleta-UV es la más penetrante y dañina para salud humana, por lo que interesa que en los pavimentos reflectantes esta energía se absorba y no se refleje, buscando la inocuidad de los mismos. Se ha medido la reflectancia solar en los tres espectros (UV-VIS-IR) por separado a muestras de pavimentos reflectantes mediante espectrografías.

La mezcla reflectante diseñada tiene una reflectancia del todo el espectro solar alrededor del 40%. Interesa saber los valores de reflectancia el espectro UV, y compararlo con una mezcla de pavimento asfáltico convencional.

Mediante el uso del espectrofotómetro UV-VIS-IR se han medido reflectancias a muestras de mezclas tanto reflectantes como convencional desde 250nm hasta 2400nm (ver gráfica 2), abarcando todo el espectro solar UV-VIS-IR. Se ha utilizado la norma de ensayo ASTM E903-12 y ASTM G173-03. Se han obtenido valores por separado, comprobándose que aunque la mezcla reflectante tenga una reflectancia solar entre 40-45%, la reflectancia del espectro UV solo es del 10%. Por lo tanto el uso de pavimentos reflectantes no son perjudiciales para la salud por su baja reflectancia.

En la gráfica de la **Figura 21** se observa las reflectancias en los espectros de longitudes de onda entre 250 y 2400nm de los dos pavimentos y el espectro que produce la nieve. La reflectancia en el UV para los dos pavimentos es similar, sobre en longitudes de onda más bajas que son más dañinas. También se aprecia que la nieve tiene una reflectancia en el UV muy alta, y es la causa por la que se necesita de protección si permanece en ella.

2.3.1.5. Conclusiones.-

Las conclusiones obtenidas después de los procesos de investigación realizados en base a la mezcla reflectante diseñada BBTM-5A, por la posibilidad de utilizar bajos espesores, son las siguientes:

- Las mezclas reflectantes diseñadas cumplen con las especificaciones recogidas en el PG-3, siendo sus resultados similares a las mezclas asfálticas convencionales.

- La temperatura interna en las mezclas reflectantes expuestas a la intemperie es inferior a las mezclas convencionales al mismo nivel obtenido en la superficie.

- A los ocho meses de exposición a la intemperie no hay oscurecimiento de las mezclas reflectantes.

- Tienen una reflectancia muy baja en el espectro UV, al absorber el 90% del espectro UV (aunque tengan reflectancia solar total alta), por lo que los nuevos pavimentos no son perjudiciales para la salud.

Como conclusión final, podemos decir que los pavimentos asfálticos reflectantes pueden contribuir de una manera preventiva frente al cambio climático mediante su aportación a la reducción de emisiones de CO2, por su impacto en la reducción de consumos energéticos para climatización e iluminación urbana, y también pueden contribuir desde un punto de vista correctivo a mitigar los efectos del exceso de calor en verano en zonas urbanas.

REIVINDICACIONES

1. Pavimentos asfálticos de alta reflectancia solar, con índice SR igual o superior a 33% conforme a certificación LEED v4 BD+C, para los dos tipos de mezclas bituminosas en caliente que se utilizan comúnmente como capas asfálticas de rodadura en calles y carreteras: mezclas de hormigón bituminoso tipo AC, conforme a UNE-EN 13108-1, y mezclas discontinuas tipo BBTM, conforme a UNE-EN 13108-2, desarrollados en base a los siguientes parámetros físico-químicos determinantes del tipo y composición de las mezclas: áridos calizos para gruesos y finos, o áridos porfídicos para gruesos y calizos para finos, menor tamaño máximo de árido grueso, ligante sintético pigmentable de tonalidad clara o incoloro, óxidos de titanio blancos, óxidos de hierro rojos y/u óxidos de hierro amarillos como aditivos, granulometría densa/semidensa, tipo D o S para mezclas AC, o tipo A o B para mezclas discontinuas BBTM, menor cantidad de huecos, y menor textura superficial (baja macroextrutura); **caracterizados** por mezclas asfálticas de rodadura tipo:

- AC16 SURF D, con tamaño máximo de árido de 16 mm, dióxido de titanio (TiO_2) blanco como aditivo, granulometría tipo D, cantidad de huecos máxima de 7%, y ligante sintético pigmentable en una dotación mínima de 5,5% en masa sobre el total de la mezcla.

- BBTM 5A y BBTM 8A, mezclas discontinuas con tamaño máximo de árido de 8 mm, dióxido de titanio (TiO_2) blanco como aditivo, granulometría tipo A, cantidad de huecos máxima de 16%, y ligante sintético pigmentable en una dotación mínima de 5,5% en masa sobre el total de la mezcla.

2. Pavimentos asfálticos de mejorada reflectancia solar, para los dos tipos de mezclas bituminosas en caliente que se utilizan comúnmente como capas asfálticas de rodadura en calles y carreteras: mezclas de hormigón bituminoso tipo AC, conforme a UNE-EN 13108-1, y mezclas discontinuas tipo BBTM, conforme a UNE-EN 13108-2, con unos parámetros físico-químicos para los diferentes tipos y composiciones de mezclas según reivindicación 1, **caracterizados** por una tasa de material reciclado procedente de fresado de firmes de asfaltos (RAP) tipo AC16 SURF S, de hasta un 25%.

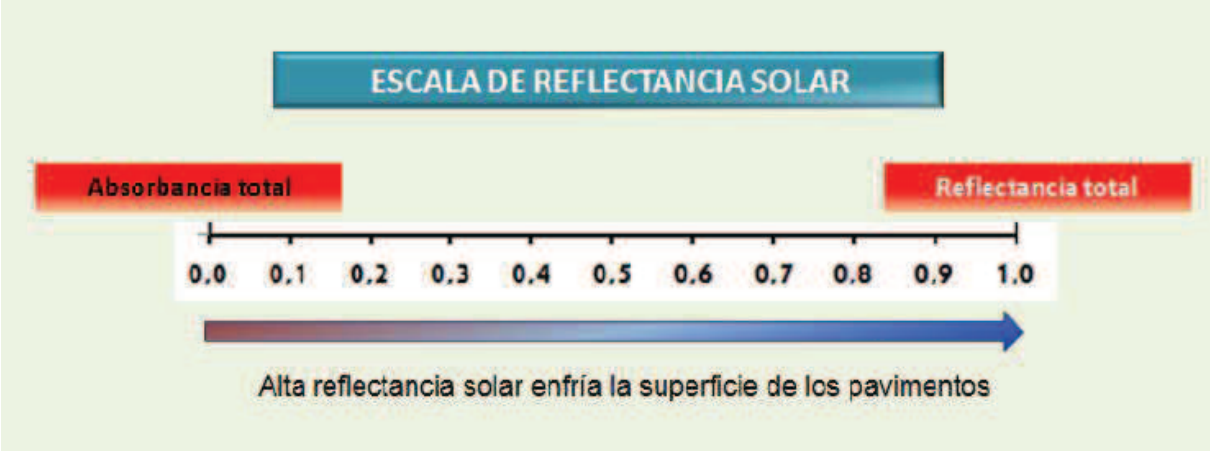

ESCALA DE REFLECTANCIA SOLAR
Absorbancia total
Reflectancia total
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
Alta reflectancia solar enfría la superficie de los pavimentos

Fig.1

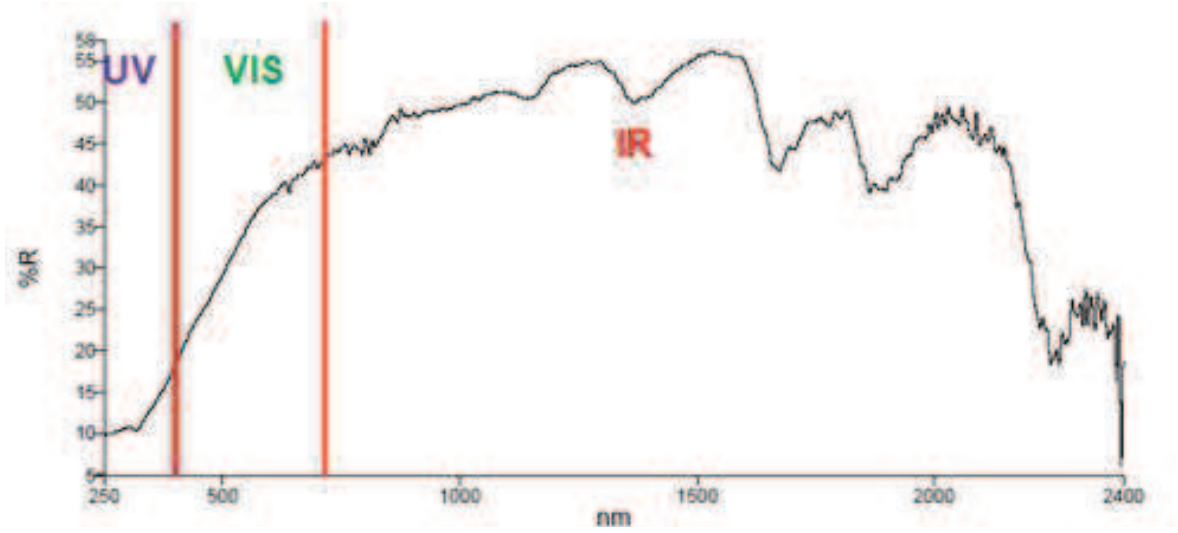

UV
VIS
IR
%R
nm
250
500
1000
1500
2000
2400

Fig.2

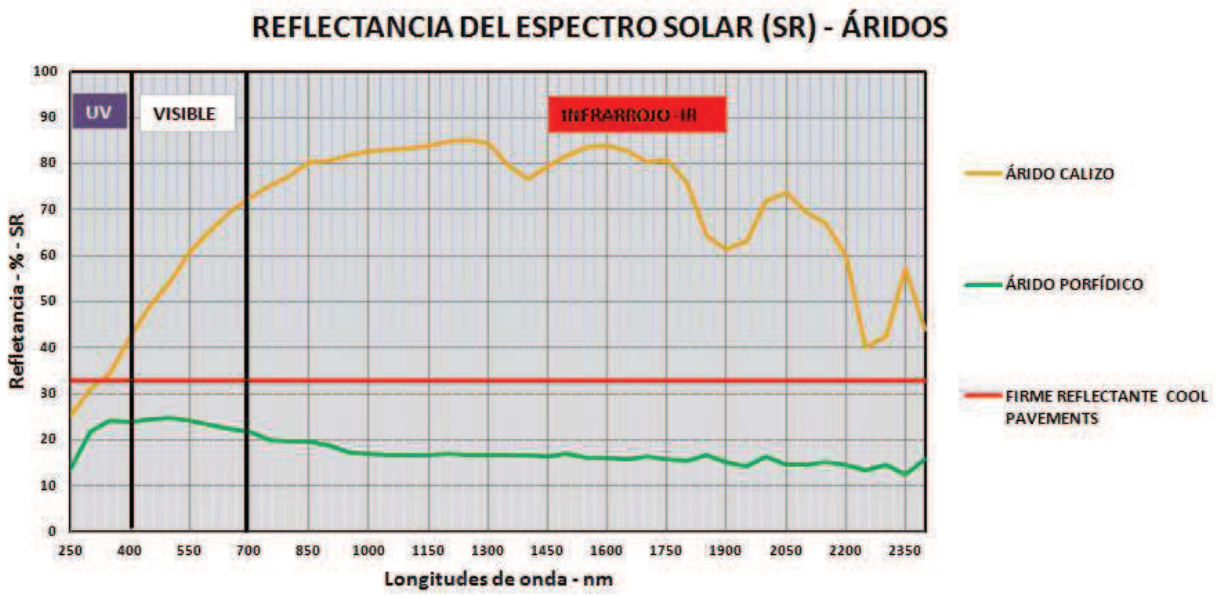

REFLECTANCIA DEL ESPECTRO SOLAR (SR) - ÁRIDOS
UV
VISIBLE
INFRARROJO -IR
Refletancia - % - SR
Longitudes de onda - nm
ÁRIDO CALIZO
ÁRIDO PORFÍDICO
FIRME REFLECTANTE COOL PAVEMENTS

Fig.3

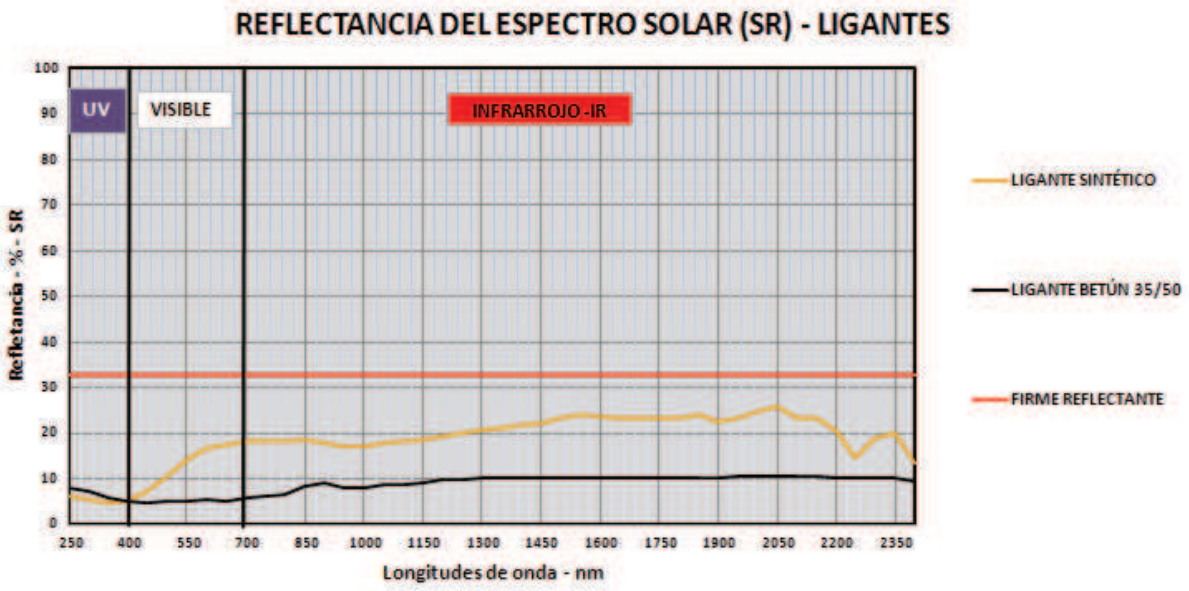

REFLECTANCIA DEL ESPECTRO SOLAR (SR) - LIGANTES
UV
VISIBLE
INFRARROJO -IR
Refletancia - % - SR
Longitudes de onda - nm
LIGANTE SINTÉTICO
LIGANTE BETÚN 35/50
FIRME REFLECTANTE

Fig.4

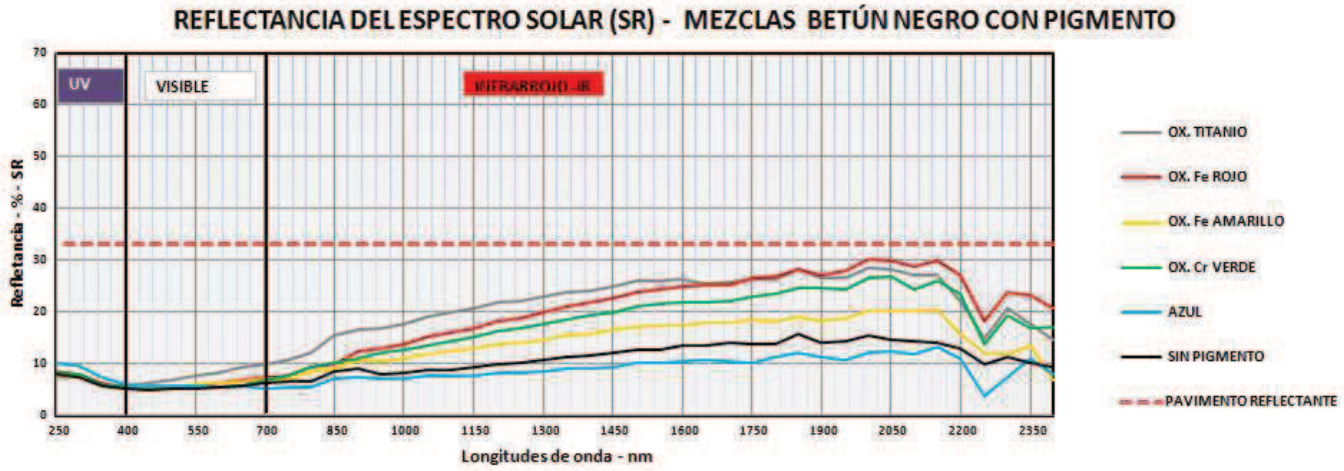

REFLECTANCIA DEL ESPECTRO SOLAR (SR) - MEZCLAS BETÚN NEGRO CON PIGMENTO
UV
VISIBLE
INFRARROJO -IR
Reflectancia - % - SR
Longitudes de onda - nm
OX. TITANIO
OX. Fe ROJO
OX. Fe AMARILLO
OX. Cr VERDE
AZUL
SIN PIGMENTO
PAVIMENTO REFLECTANTE

Fig.5

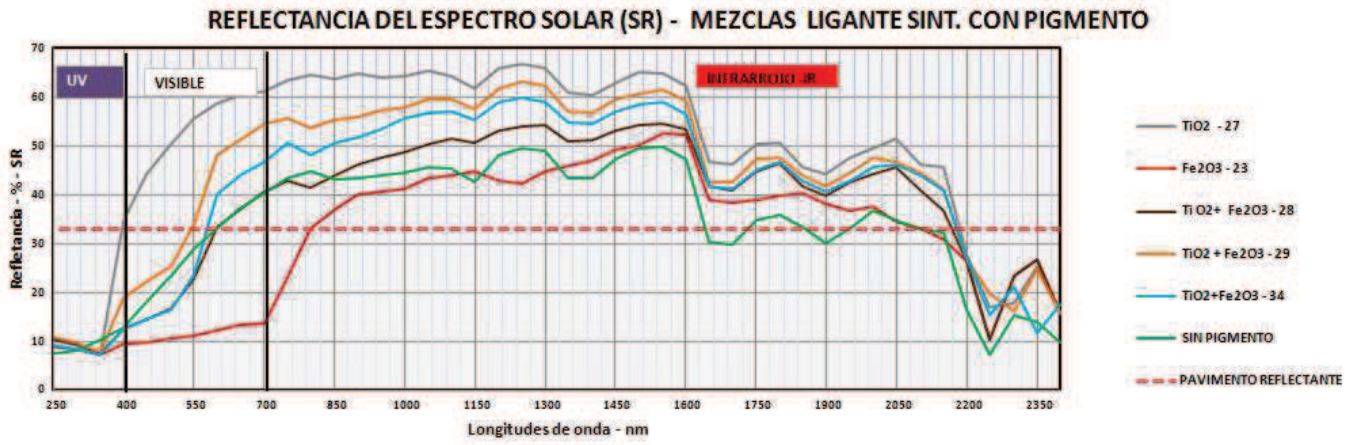

REFLECTANCIA DEL ESPECTRO SOLAR (SR) - MEZCLAS LIGANTE SINT. CON PIGMENTO
UV
VISIBLE
INFRARROJO -IR
Reflectancia - % - SR
Longitudes de onda - nm
TiO2 - 27
Fe2O3 - 23
Ti O2+ Fe2O3 - 28
TiO2 + Fe2O3 - 29
TiO2+Fe2O3 - 34
SIN PIGMENTO
PAVIMENTO REFLECTANTE

Fig.6

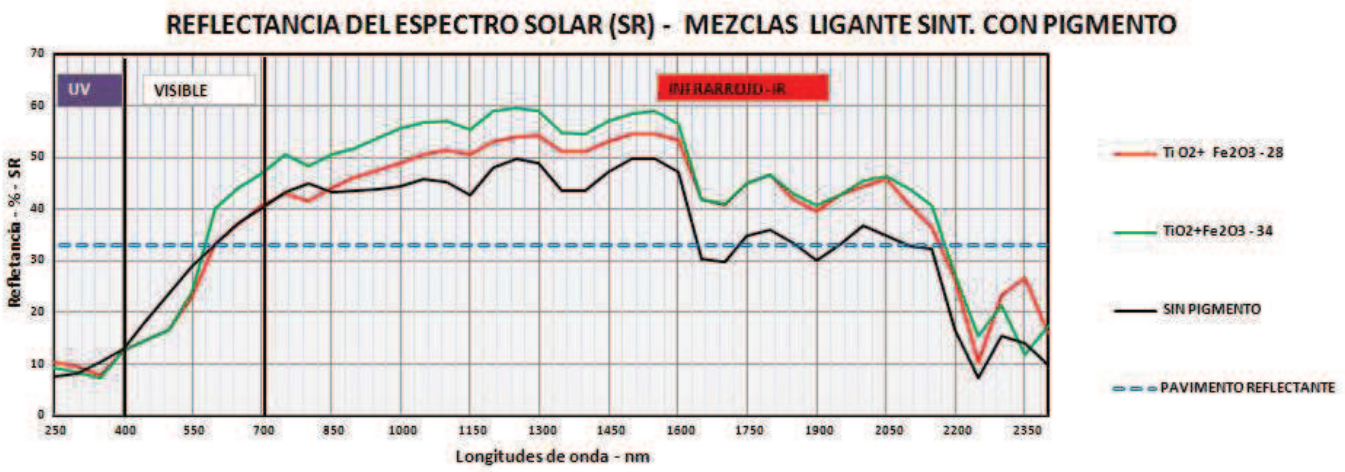


Fig.7

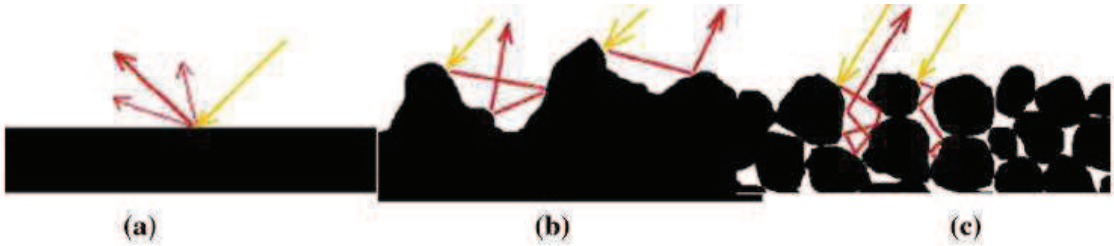


Fig.8

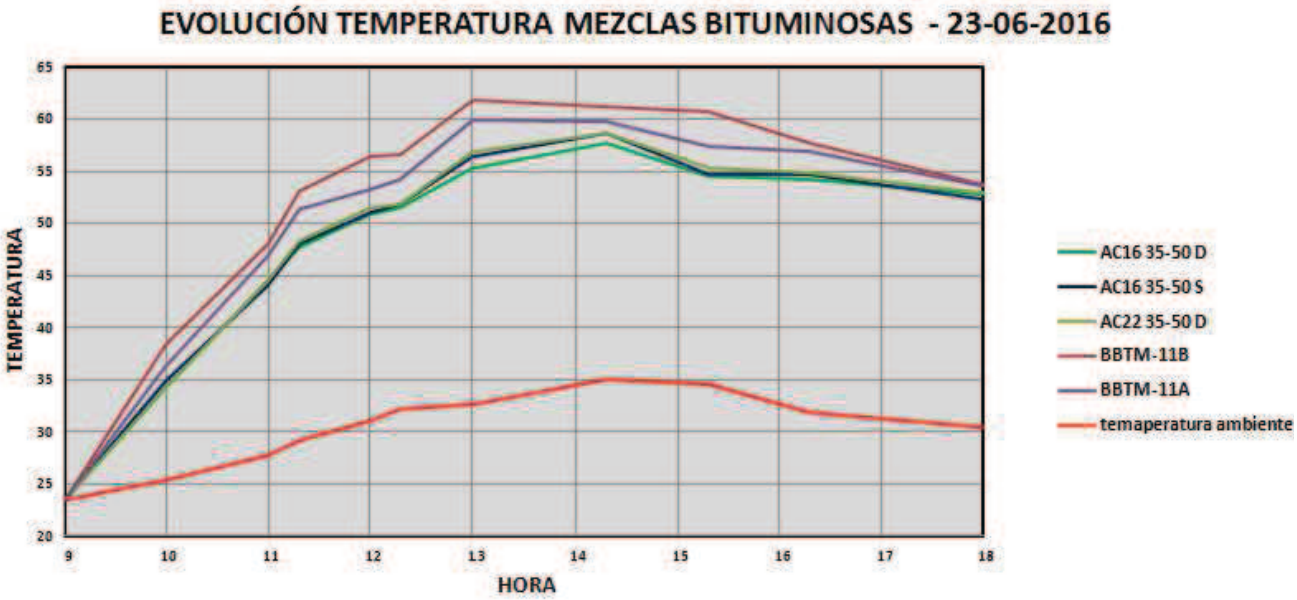


Fig.9

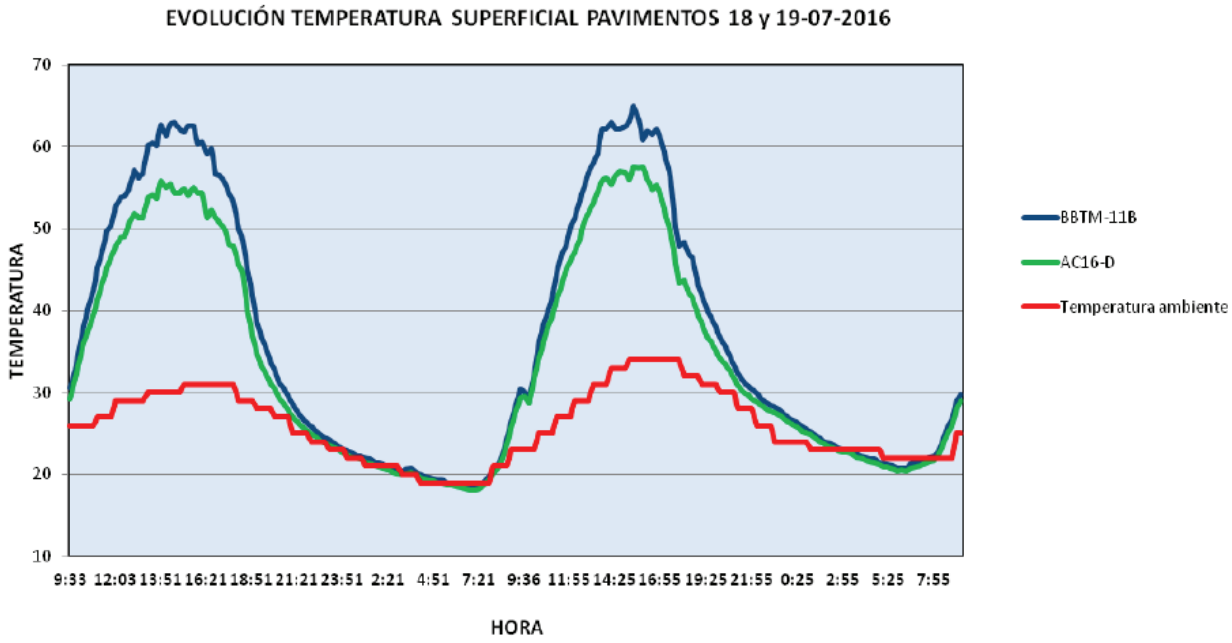

EVOLUCIÓN TEMPERATURA SUPERFICIAL PAVIMENTOS 18 y 19-07-2016
TEMPERATURA
70
60
50
40
30
20
10
9:33 12:03 13:51 16:21 18:51 21:21 23:51 2:21 4:51 7:21 9:36 11:55 14:25 16:55 19:25 21:55 0:25 2:55 5:25 7:55
HORA
BBTM-11B
AC16-D
Temperatura ambiente

Fig.10

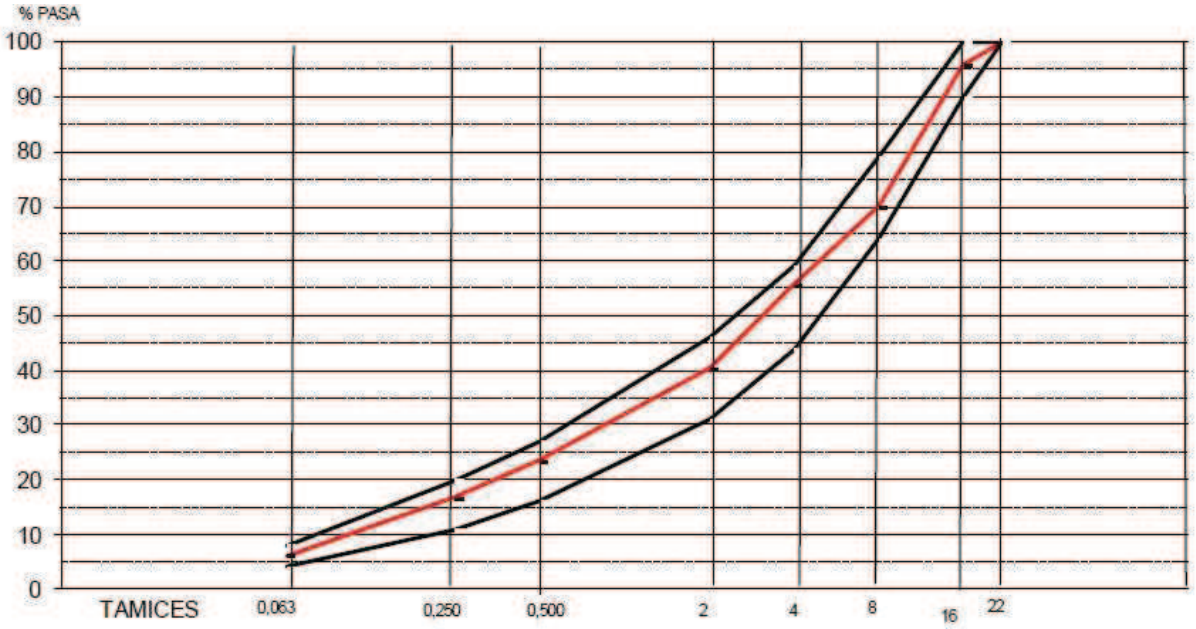

% PASA
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
TAMICES
0,063
0,250
0,500
2
4
8
16
22

Fig.11

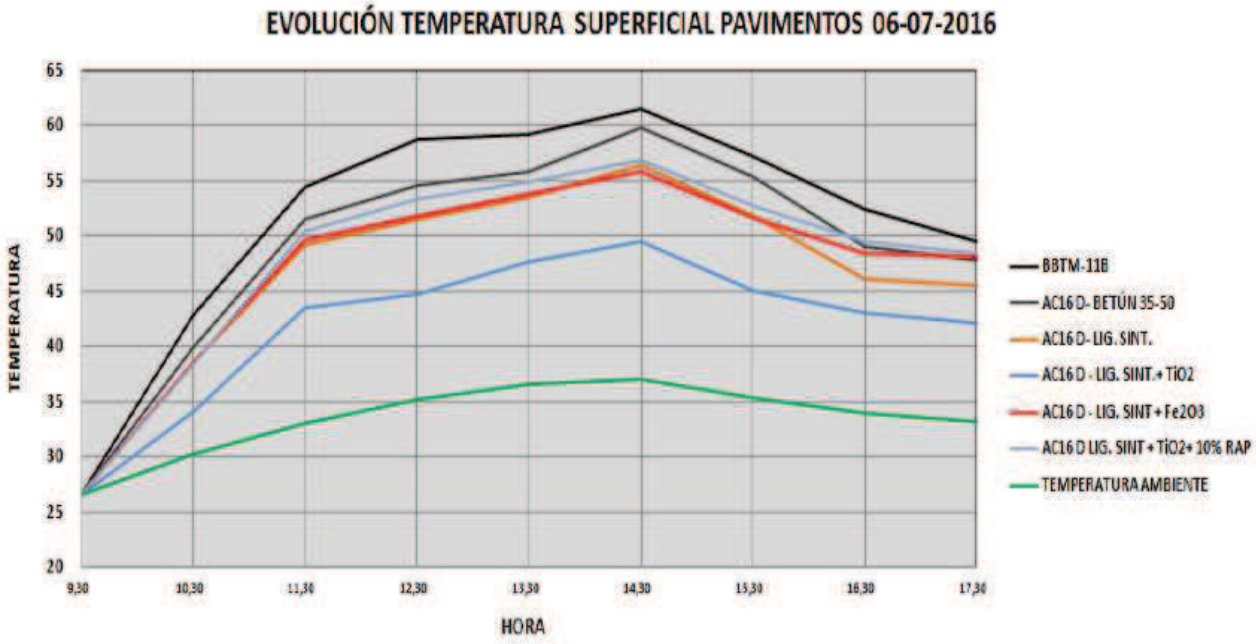

EVOLUCIÓN TEMPERATURA SUPERFICIAL PAVIMENTOS 06-07-2016
TEMPERATURA
HORA
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
9,30
10,30
11,30
12,30
13,30
14,30
15,30
16,30
17,30
BBTM-11B
AC16 D- BETÚN 35-50
AC16 D- LIG. SINT.
AC16 D - LIG. SINT.+ TiO2
AC16 D - LIG. SINT + Fe2O3
AC16 D LIG. SINT + TiO2+ 10% RAP
TEMPERATURA AMBIENTE

Fig.12

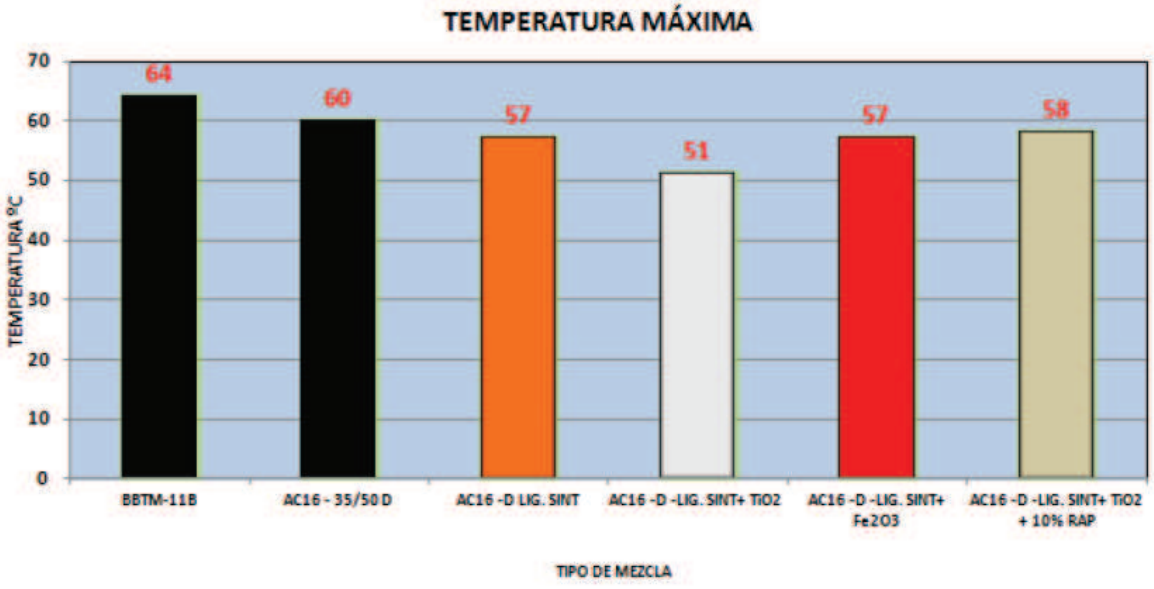

TEMPERATURA MÁXIMA
TEMPERATURA ºC
TIPO DE MEZCLA
70
60
50
40
30
20
10
0
64
60
57
51
57
58
BBTM-11B
AC16 - 35/50 D
AC16 -D LIG. SINT
AC16 -D -LIG. SINT+ TiO2
AC16 -D -LIG. SINT+ Fe2O3
AC16 -D -LIG. SINT+ TiO2 + 10% RAP

Fig.13

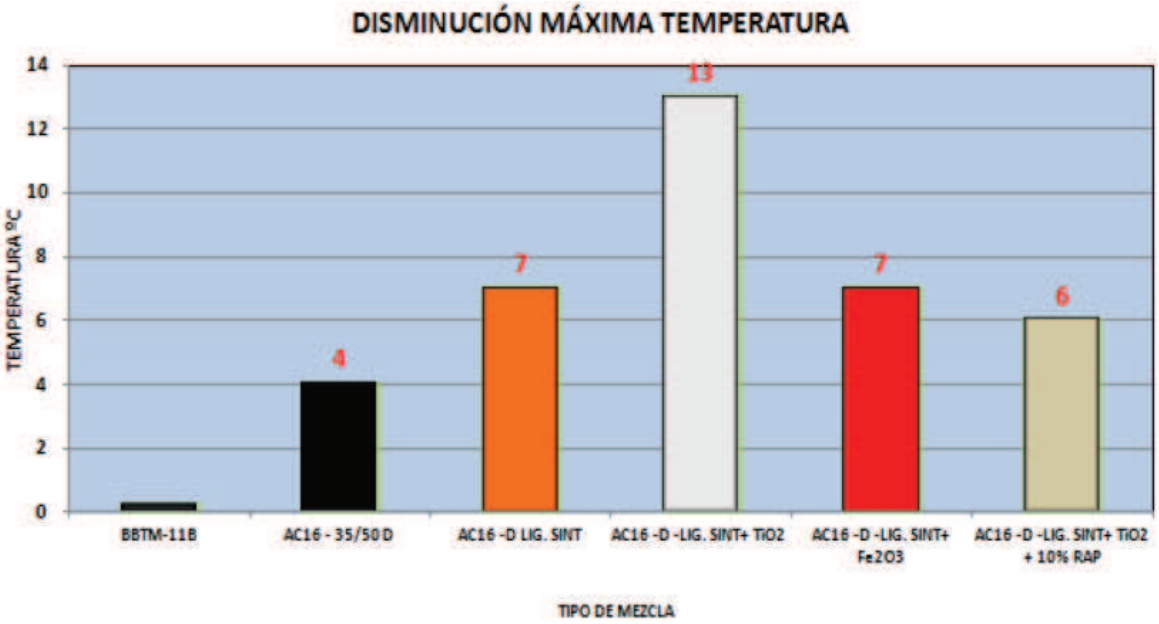

DISMINUCIÓN MÁXIMA TEMPERATURA
TEMPERATURA ºC
14
12
10
8
6
4
2
0
4
7
13
7
6
BBTM-11B
AC16 - 35/50 D
AC16 -D LIG. SINT
AC16 -D -LIG. SINT+ TiO2
AC16 -D -LIG. SINT+ Fe2O3
AC16 -D -LIG. SINT+ TiO2 + 10% RAP
TIPO DE MEZCLA

Fig.14

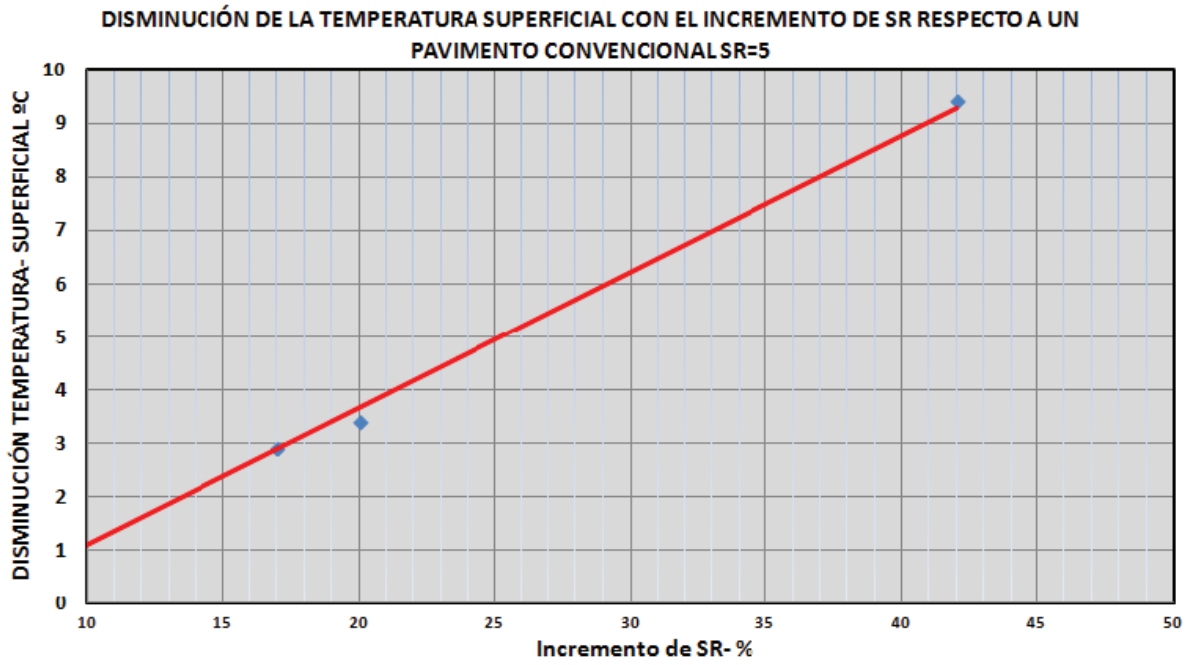

DISMINUCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL CON EL INCREMENTO DE SR RESPECTO A UN PAVIMENTO CONVENCIONAL SR=5
DISMINUCIÓN TEMPERATURA- SUPERFICIAL ºC
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Incremento de SR- %

Fig.15

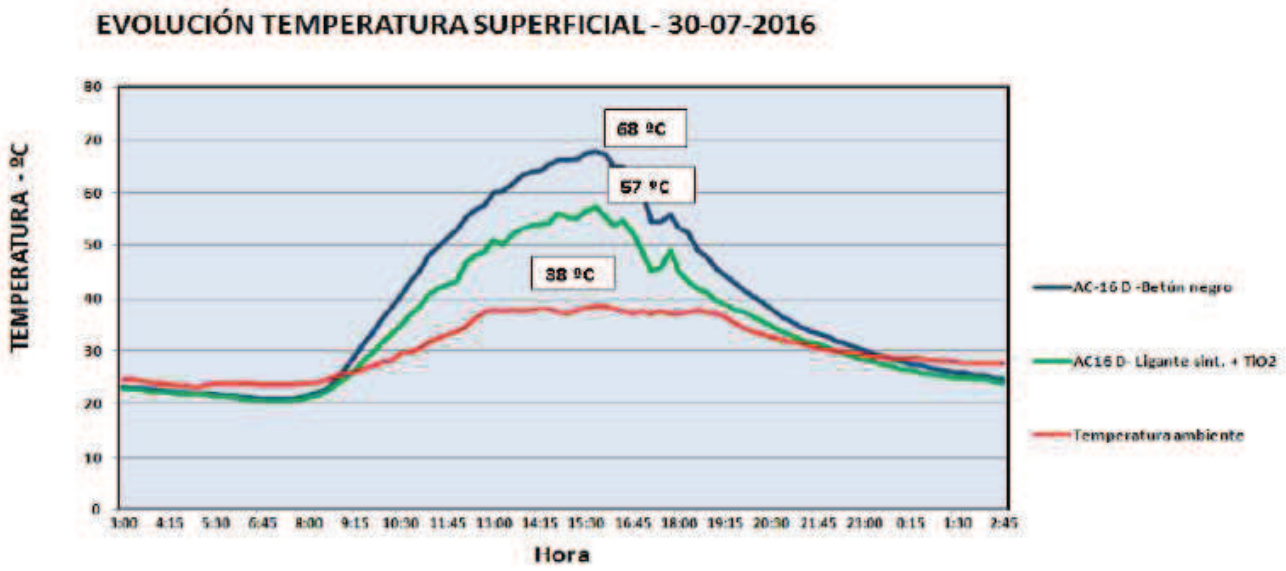

EVOLUCIÓN TEMPERATURA SUPERFICIAL - 30-07-2016
TEMPERATURA - ºC
68 ºC
57 ºC
38 ºC
AC-16 D -Betún negro
AC16 D- Ligante sint. + TiO2
Temperatura ambiente
Hora

Fig.16

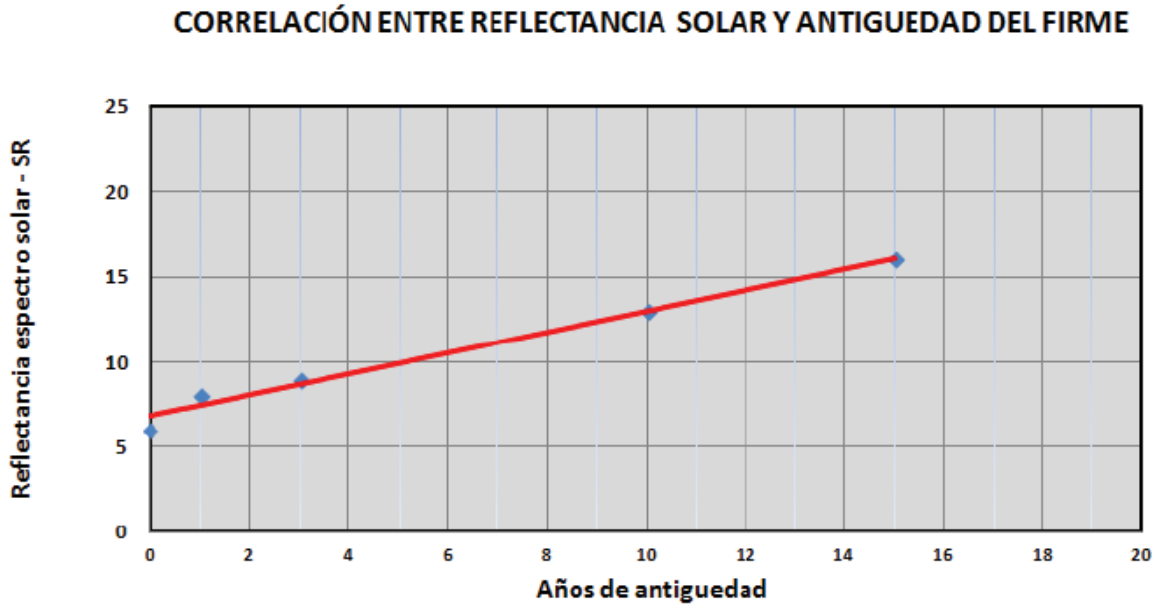

CORRELACIÓN ENTRE REFLECTANCIA SOLAR Y ANTIGUEDAD DEL FIRME
Reflectancia espectro solar - SR
Años de antiguedad

Fig.17

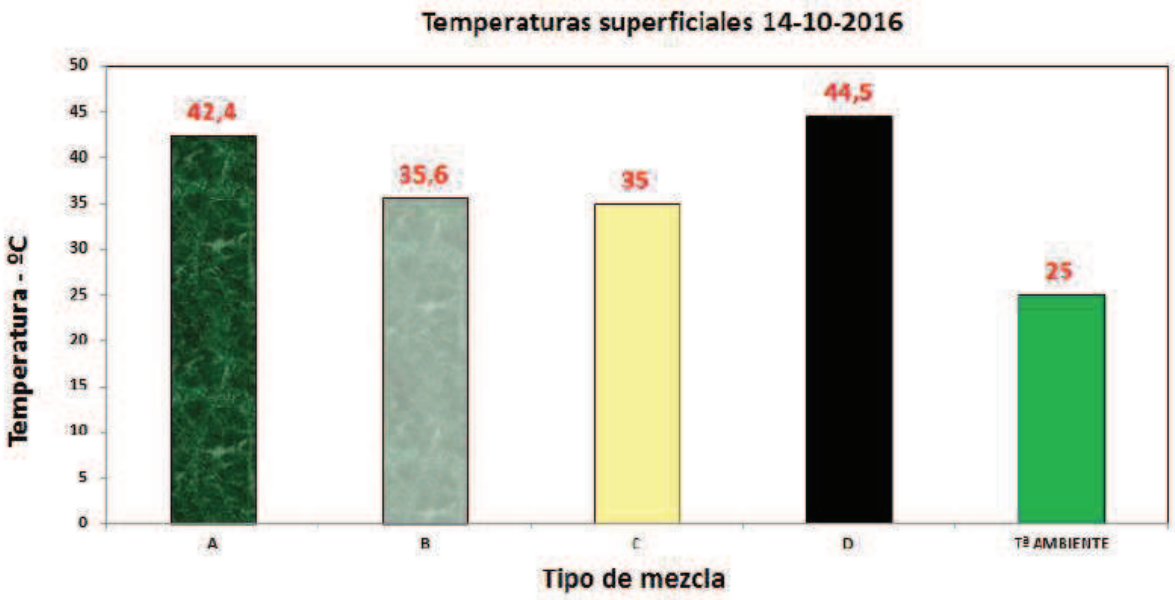

Temperaturas superficiales 14-10-2016
Temperatura - ºC
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
42,4
35,6
35
44,5
25
A
B
C
D
Tª AMBIENTE
Tipo de mezcla

Fig.18

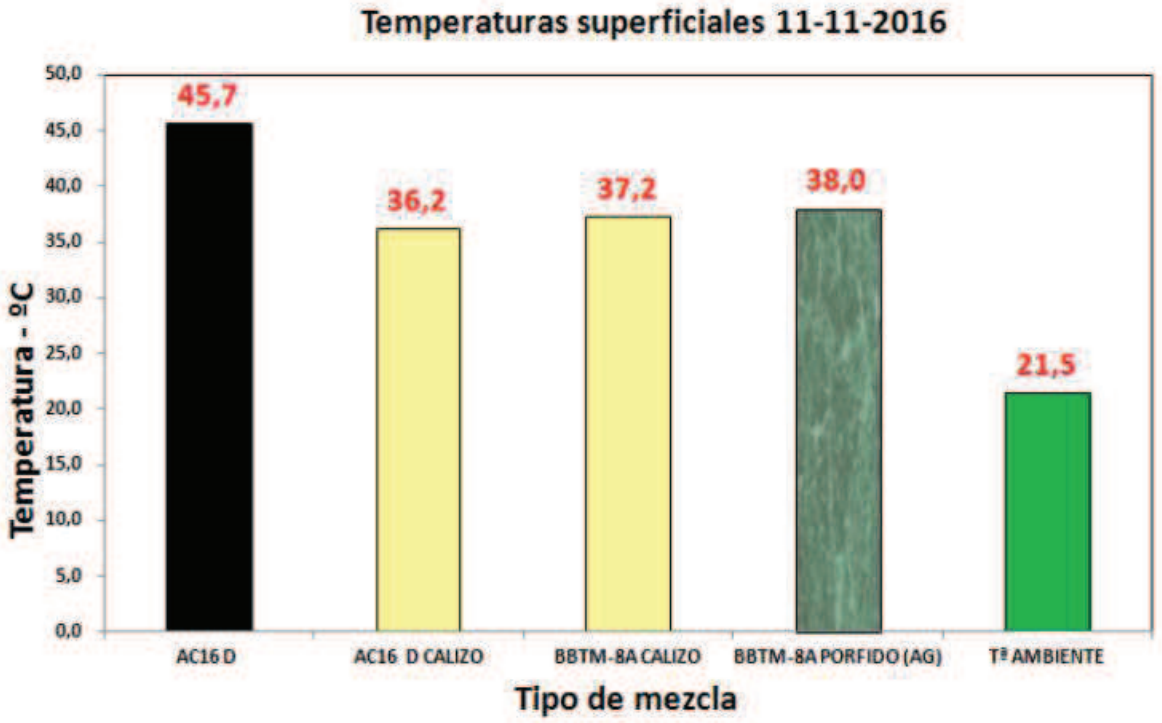

Temperaturas superficiales 11-11-2016
Temperatura - ºC
50,0
45,0
40,0
35,0
30,0
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
45,7
36,2
37,2
38,0
21,5
AC16 D
AC16 D CALIZO
BBTM-8A CALIZO
BBTM-8A PORFIDO (AG)
Tª AMBIENTE
Tipo de mezcla

Fig.19

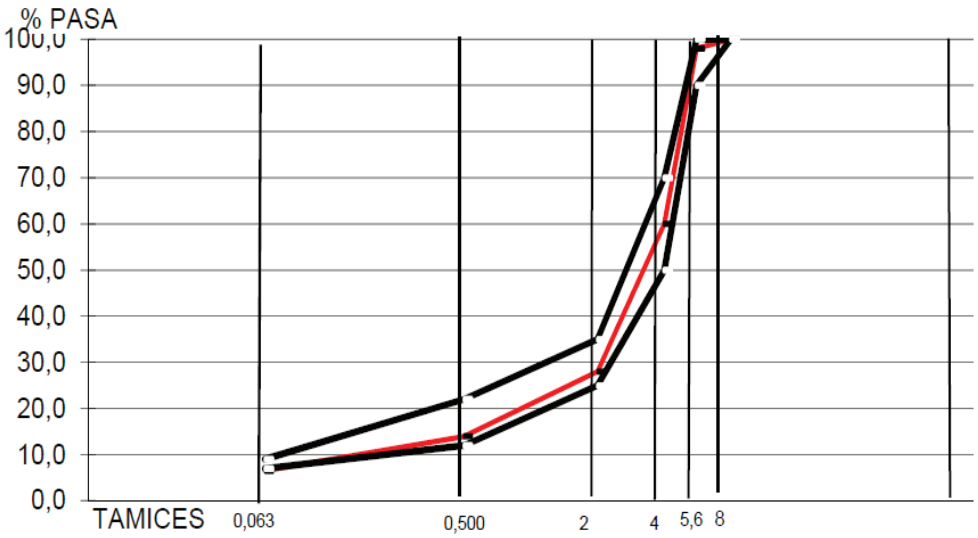

% PASA
100,0
90,0
80,0
70,0
60,0
50,0
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
TAMICES
0,063
0,500
2
4
5,6
8

Fig.20

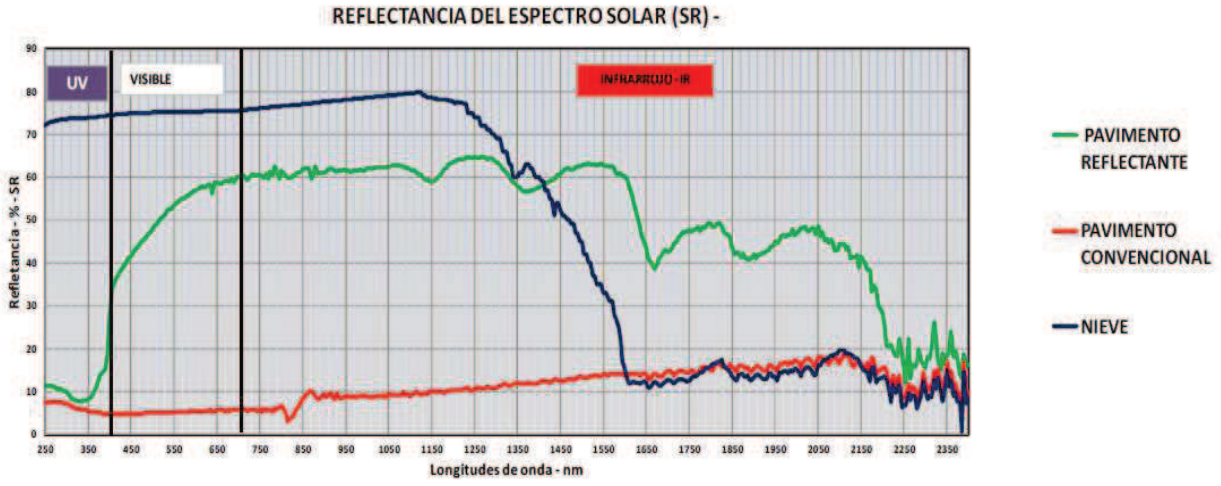

REFLECTANCIA DEL ESPECTRO SOLAR (SR) -
UV
VISIBLE
INFRARROJO - IR
Reflectancia - % - SR
Longitudes de onda - nm
PAVIMENTO REFLECTANTE
PAVIMENTO CONVENCIONAL
NIEVE

Fig.21