

DIAGNÓSTICO DE ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LA ISLA DE CALOR EMPLEANDO PAVIMENTO PIGMENTADO

Brayan Cubides¹ brayan.cubides@usantoto.edu.co

Jeimy Suarez² jeimy.suarez@usantoto.edu.co

RESUMEN

El Efecto Isla de Calor o Urban Heat Island (UHI), consiste en el incremento en la temperatura ambiente generado por la constante urbanización y edificación masiva. Los pavimentos son importantes receptores de radiación solar, lo que lleva a incrementar tanto la temperatura interna, como a afectar su vida útil. El presente artículo sintetiza las investigaciones realizadas hasta el momento sobre el uso de nuevas tecnologías de pavimentos pigmentados y fríos, sus beneficios, ventajas y desventajas, a la hora de controlar la temperatura del pavimento y mitigar el UHI. Los pavimentos pigmentados y fríos, si disminuyen la probabilidad de presentarse el UHI y en determinados casos mejora las propiedades de la mezcla, comparándola con un diseño tradicional.

Palabras clave: *Coloración, Pavimentos pigmentados, Efecto Isla de Calor, Pavimentos fríos, Aglutinante*

ABSTRACT

The Urban Heat Island (UHI) effect is the increase in ambient temperature generated by constant urbanization and massive building. The pavements are important receivers of solar radiation, which leads to an increase in the internal temperature, as well as affecting their useful life. This article summarizes the research carried out so far on the use of new technologies of pigmented and cold pavements, their benefits, advantages and disadvantages, when controlling the temperature of the pavement and mitigating the UHI. The pigmented and cold pavements, if they diminish the probability of appearing it and in certain cases it improves the properties of the mixture, comparing it with a traditional design.

Keywords: *Coloring, Pigmented pavements, Urban Heat Island Effect, Cold pavements, Binder*

INTRODUCCIÓN

Las altas temperaturas y los niveles de radiación solar, son factores que afectan considerablemente los pavimentos. La aplicación de nuevas tecnologías en el diseño de un pavimento promueve la mejora del entorno y con resultados en la disminución de temperatura del mismo [3]. Tecnologías como micro superficies de color se han vuelto cada vez más populares en la construcción de pavimentos debido a su beneficio económico y su capacidad de aceptar el tráfico rápidamente [7]. El asfalto de color o pavimento (CAP), mejora no solo la apariencia urbana sino también la seguridad de conducir en intersecciones, puentes y túneles. El uso de recubrimientos de colores fríos podría mejorar el confort térmico exterior y mitigar el efecto de isla de calor. En comparación con el pavimento de asfalto negro tradicional, CAP mostró una mayor reflectancia que redujo la radiación absorbida y disminuyó la temperatura ambiente durante períodos de sol [1].

Entre otros efectos provocados por el UHI incluyen entre otros, temperaturas elevadas, aumento del consumo de energía, contaminación del aire, y alteración de los ecosistemas. Se plantean estrategias para mitigar dichos efectos, a partir de techos reflectantes, techos verdes, vegetación urbana y sombreado, disipadores de calor y pavimentos fríos [42].

La isla de calor urbano es un problema global y una consecuencia de la rápida urbanización que conduce a una mayor temperatura de la superficie del suelo en las zonas urbanas. El rango es de $0,6^{\circ}\text{C}$ - $1,3^{\circ}\text{C}$ en comparación con las áreas rurales y suburbanas [2].

El asfalto convencional generalmente cuando es expuesto a radiaciones solares muestra un incremento en la temperatura de su superficie con respecto a la temperatura ambiental, y a la temperatura del suelo. Como consecuencia de dicho aumento se producen fenómenos como envejecimiento del pavimento y deformación permanente debida a cargas cíclicas [5].

Debido a la necesidad de mantener la temperatura del pavimento asfáltico y de sus alrededores menor a la que presentan los pavimentos asfálticos convencionales se plantea reemplazar la superficie negra por el uso de materiales en gran medida reflectantes y emisivos de colores blancos brillantes. Con el uso de materiales de pavimentación más ligeros los valores de reflectancia solar y emitancia infrarroja aumenta, como efecto se obtienen temperaturas de la superficie más frías en comparación a la de pavimentos convencionales [4].

En otros estudios se propone la implementación de nuevas estrategias que permitan la ejecución de pavimentos asfálticos fríos (que absorben poca insolación) en cuanto a radiación solar a partir del uso de pavimentos asfálticos modificados con pigmentos. Se tienen pigmentos variados en muestras de asfalto para evaluar la inercia térmica, relacionando la conducción de calor y enfriamiento, utilizando

pigmentos de óxido metálico para la obtención de los especímenes de pavimento coloreados [4].

El uso de nuevos pavimentos pigmentados trae otros beneficios, además de reducir la temperatura mejorando la calidad del aire, con esta disminución se logra mostrar que puede aumentar al mismo tiempo la vida útil de los pavimentos. Así mismo, los pavimentos reflectantes son capaces de mejorar la visibilidad nocturna, reduciendo costos en cuanto a los requisitos de iluminación y ahorro de energía [1].

El asfalto es el material principal utilizado para terminar las calles internas y externas de las ciudades. Recientemente ha surgido en algunos países, el uso de colores agregados al asfalto, para utilizarlo en pavimentos para transitar, ciclovías, parques y espacios abiertos [6]. El presente artículo se realiza para recopilar información de bases de datos, revistas de investigación de ingeniería y seminarios; entorno a la investigación realizada hasta el momento sobre asfaltos de colores. Esto con el fin de concluir si su uso es determinante en la reducción del efecto isla de calor.

MÉTODO

Para la búsqueda bibliográfica se identificaron las principales bases de datos de ingeniería e investigación. Como *ScienceDirect*, *Scielo*, *Web of sciences*; revistas de ingeniería de universidades a nivel mundial y publicaciones de documentos web. Los criterios de selección propuestos incluyen dos aspectos relevantes: Pigmentación en asfaltos y estrategias de mitigación del efecto isla de calor. La veracidad y fiabilidad de los artículos seleccionados radica en los resultados de tesis y ensayos de laboratorio hechos sobre el tema.

Autores como [8] que presentan el efecto del Óxido de Hierro (Pigmento) en las características mecánicas del pavimento, por medio de ensayos y resultados de laboratorios como módulo resiliente, fatiga y máquina *Wheel tracker*.

De acuerdo con [4] para la preparación de las muestras de asfalto pigmentado es recomendable utilizar un promedio de concentración de pigmento del 4% en peso de la mezcla total. Con la adición de pigmentos sobre las capas asfálticas se pretende evaluar la superficie en términos de conducción de calor y enfriamiento a través de disipadores de calor bajo configuración experimental conectados a un sistema de registro de datos.

Un fenómeno resultado de los procesos de urbanización es el denominado “albedo” el cual consiste en la cantidad de energía solar que una superficie refleja, se encuentra en un rango de 0 - 1, y se asocia con la blancura de la superficie, representado por dos superficies, una “absorbente” y otra “reflectante”. Los pavimentos de hormigón pueden ser muy reflectantes si el hormigón se mezcla con materiales cementosos blanquecinos y agregados de color claro. Una medida de

cenizas volantes que reacciona con el hidróxido de calcio tiene influencia en el incremento de la vida útil del pavimento, sin embargo puede reducir un poco el albedo debido a que las cenizas volantes son más oscuras que el cemento Portland. Pero la escoria puzolánica aumenta el albedo porque la escoria presenta mayor reflectancia que las cenizas volantes. El experimento demostró que aumentar el albedo disminuye linealmente la temperatura máxima diaria de la superficie y que la tasa de disminución es de aproximadamente de 40 a 30. Según las pruebas de laboratorio se encontró que un albedo alto puede reducir la temperatura máxima de la superficie hasta 20 °C [35].

En [3] para el procedimiento se elaboraron 8 muestras, cada una con un pigmento diferente, se compararon con una muestra de concreto asfáltico y una de concreto hidráulico, las muestras fueron instaladas en dos zonas; la primera es una zona húmeda con vegetación abundante (Ver figura 1) y la segunda en una zona árida y desértica (Ver figura 2).



Figura 1. Muestras con los pigmentos en zona húmeda. Fuente:(García, L.2018)



Figura 2. Muestras con los pigmentos en zona árida. Fuente:(García, L.2018)

En [41] para el procedimiento de investigación, durante los dos meses de mayor calor, se registraron las temperaturas ambientales y las temperaturas de las muestras de concreto, luego de obtener análisis estadísticos, se seleccionaron los dos colores que mejor registro obtuvieron. De acuerdo a las figuras 3 y 4 se puede

apreciar con detalle las muestras de color azul, verde y morado, ya que presentan lecturas bajas con respecto a las demás.

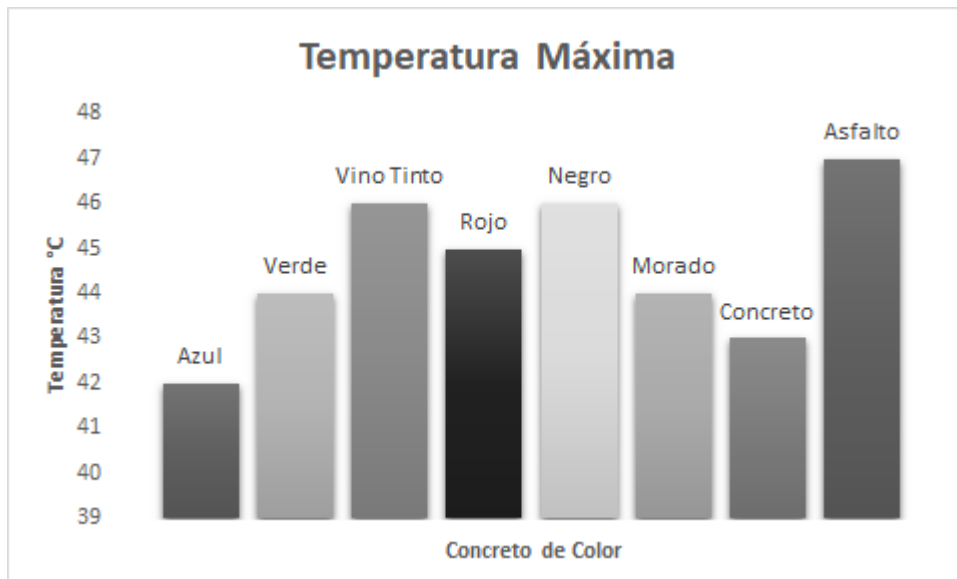


Figura 3. Temperaturas máximas registradas en la prueba. Fuente: (Torres Convers et al, 2018)

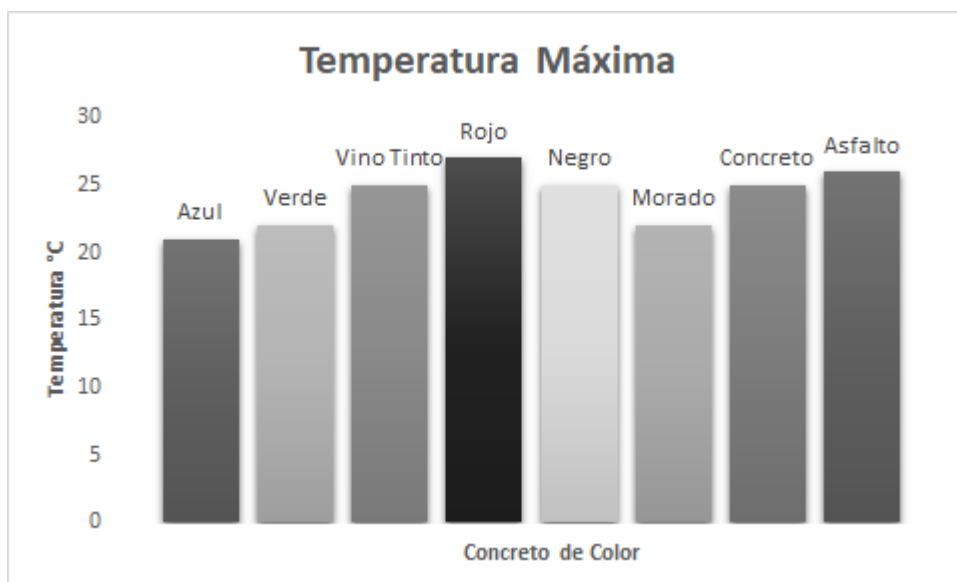


Figura 4. Temperaturas mínimas registradas en la prueba. Fuente: (Torres Convers.et al, 2018)

Según la investigación en [43] el factor que más influyó en la UHI fue la distribución de las características de la superficie urbana como los materiales de construcción y la densidad de las superficies impermeables. Dichos materiales y superficies

mostraron propiedades radiantes, térmicas, de humedad, las cuales fueron influenciadas por el ambiente circundante. Las propiedades radiativas y térmicas de los materiales implementados en el entorno urbano como, emisividad, y la conductividad térmica, se reflejan, absorben, emiten y almacenan, estas propiedades tienen una influencia en el cambio del microclima local y a su vez pueden aumentar el UHI.

[44] Otros autores afirman el uso de energía fotovoltaica como estrategia para mitigar las temperaturas superficiales de los pavimentos, existe el potencial de reducción de microescala y mesoescala en la Isla de Calor Urbana. Además conlleva otro beneficio de reducir potencialmente las necesidades de enfriamiento mecánico, al reducir el efecto de retardo de histéresis.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Control de la temperatura del Pavimento

A nivel mundial se ha buscado disminuir la temperatura del pavimento con el fin de evitar distintas patologías y simultáneamente ayudar al ecosistema. Objetivos medioambientales como la reducción del consumo de combustibles fósiles o las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante el desarrollo de nuevas fuentes de energía renovable han propiciado la aparición de los denominados colectores solares de asfalto [29]. La aplicación eficiente de los colectores de asfalto como el estudio adecuado del efecto de la radiación solar sobre el comportamiento del pavimento asfáltico se ven directamente afectados por la pérdida de color que se produce con el paso del tiempo [11]. El uso global de este tipo de colectores podría implicar la reducción de la temperatura ambiental en áreas urbanas y, finalmente, una mitigación del efecto isla de calor urbano [29].

El UHI (Urban Heat Island) es un efecto que al igual que el Urban noise island (UNI), se caracteriza por presentarse en ciudades de gran tamaño. La explotación de bioaceites en el mercado de pavimentos puede considerarse como una solución verde prometedora para mitigar tanto la UHI como la UNI[9]. El desarrollo de un aglutinante de pavimento a base de resina mediante análisis multi físico, junto con cuatro aglutinantes innovadores hechos con bioaceites de desecho; permitió demostrar que: todos los aglutinantes tienen una reflectancia solar superior al 50% dentro del rango de 750–1600 nm y un coeficiente de absorción acústica superior a 0,8 dentro de 600–800 Hz [9].

El material de desecho de construcción y demolición tiene un gran potencial para su uso en la ingeniería de pavimentos. Mediante una serie de métodos de prueba y técnicas de simulación con asfalto de masilla de piedra (SMA) que contiene 10%,

20%, 30%, 40% y 50% de áridos de desechos cerámicos gruesos (CASMA) se diseñó por primera vez una mezcla utilizando el método Marshall [10].

Con base en los resultados de las pruebas y los resultados de la simulación numérica, se concluyó que presenta susceptibilidad a la humedad y rendimiento anti-agrietamiento sin dejar de cumplir con los requisitos técnicos con un contenido de CA de hasta el 40%. Por otro lado, los CASMA pueden enfriar la temperatura del pavimento en 11,5 ° C en la parte inferior de las capas de asfalto [10].

Tecnología de pigmentación de pavimentos.

Al diseñar un pavimento de color, como cualquier otro pavimento de carreteras, se deben examinar y evaluar una serie de factores para garantizar que se coloque una superficie adecuada que satisfaga los requisitos en términos de eficiencia y durabilidad [12], [13]. Además, en ausencia de indicaciones reglamentarias específicas o directrices ampliamente utilizadas como señales de tránsito, un enfoque analítico cromático podría asumir implicaciones aplicadas y operativas [14].

En Atenas, desarrollaron cinco muestras de asfalto de capa fina de color (verde, rojo, amarillo, beige y blanquecino) mezclando un aglutinante de asfalto elastomérico (incoloro) y agregando pigmentos y agregados de tamaños y colores especiales [1] como se aprecia en la Figura 5.



Figura 5. Muestras de Asfalto (1. beige, 2. Blanquecino, 3. verde, 4. rojo, 5. amarillo) de capa fina de color. Fuente: (Afroditi Synnefa, 2011)

La simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) se utiliza para evaluar el impacto térmico y energético de la aplicación de las muestras en espacios exteriores (carreteras). El espectrofotométrico y las mediciones mostraron que las muestras de asfalto de capa fina coloreadas con pigmentos (Figura 5), presentan valores de reflectancia mayores en comparación con los de asfalto convencional. [1].

Se sabe que las propiedades reológicas del asfalto varían significativamente según el tipo de asfalto y la modificación [35]. Para ello, se investigaron los efectos de modificación de polímeros simples como aglutinantes de asfalto sintético de color

claro (LCSA, por sus siglas en inglés) utilizando aceite aromático, resina de petróleo y varios modificadores poliméricos. Los polímeros utilizados incluían copolímeros de bloque de estireno-butadieno-estireno (SBS), copolímero de etileno-acetato de vinilo (EVA) y polietileno (PE)[25]. En general, la adición de polímero tiende a reducir el módulo complejo a alta frecuencia (rango de temperatura baja), pero aumenta el módulo complejo en el rango de alta frecuencia (rango de alta temperatura). En comparación con el asfalto base convencional y el asfalto modificado con SBS, los aglutinantes LCSA con polímero muestran un marcado aumento en el módulo complejo tanto en el rango de alta frecuencia como en la baja frecuencia. El módulo complejo aumentado a altas temperaturas es bueno para la resistencia a la formación de surcos. Sin embargo, no se desea un módulo complejo más alto a bajas temperaturas, ya que puede aumentar el riesgo de fractura frágil [35].

La afectación a ciertas propiedades mecánicas depende de lograr un porcentaje óptimo de asfalto y porcentaje óptimo de pigmento, dependiendo del material utilizado. Por ejemplo en el caso de utilizar óxido de hierro [8], para establecer el porcentaje óptimo de asfalto se tienen en cuenta las variables del diseño Marshall y los ensayos de verificación para mezclas sin pigmento de hierro [8].

Distintos autores han utilizado diferentes pigmentos, como lodo rojo resultante del refinado de la bauxita para producir aluminio [15], o aglutinante de color rojo [16]; siempre con el fin de controlar el incremento de temperatura del pavimento e indicar carriles dedicados para el tránsito rápido de autobuses para mantener un alto nivel de seguridad [16] como es el caso de Ontario, Canadá.

Apuntando a la baja durabilidad del color y la falta de investigación sobre el pavimento de asfalto Color, rociando una emulsión de resina de sello anti-neumáticos en la superficie, se propuso un pavimento asfáltico de color duradero. Después de una prueba de laminación y envejecimiento a largo plazo, la durabilidad del color se evaluó mediante la función RGB en Photoshop y la fórmula de tasa de residuos. Después de un rodaje prolongado, el color de la superficie de la carretera tiende a un valor constante. Pulverizar la emulsión sobre la superficie de la carretera puede resistir las huellas de los neumáticos [22].

La aplicación de asfalto coloreado en polvo de alta resistencia se estudió mediante análisis de tamiz, densidad y prueba de penetración de cono para estudiar el rendimiento técnico. Los resultados mostraron: el rendimiento a alta temperatura de la mezcla de asfalto coloreado fue sobresaliente, pero el rendimiento a baja temperatura fue menor [28]. El asfalto de color en polvo permitiría realizar mezclas en áreas que presentan altas temperaturas.

También podría tratarse después de la instalación para aumentar la reflectancia, mediante la aplicación de revestimientos de colores claros o selladores de virutas de colores claros, y para el pavimento de asfalto existente que necesite rehabilitación mediante whitetopping (colocación de un pavimento de hormigón

sobre él) o ultrafino whitetopping (UTW), o si necesita mantenimiento por micro-superficie con color claro resina polimérica agregada y / o emulsionada [31]. Estos tratamientos podrían aplicarse a una amplia variedad de funciones desde estacionamientos hasta carreteras [18]. Sin embargo, para un pavimento sostenible, también se deben considerar las limitaciones económicas y de desempeño de estos remedios ambientales [20].

Las mezclas asfálticas de color que en el momento se encuentran en el mercado pueden ser en frío o en caliente, es de aclarar que dichas mezclas se utilizan principalmente en Europa, Canadá, Chile y algunos países de Centroamérica. Para obtener mezclas de color en caliente se usa un ligante sintético en forma pura, mientras para mezclas asfálticas de color en frío se utilizan ligantes sintéticos en forma de emulsión y adición de pigmentos. El resultado final suele ser una mezcla con tonalidades ocres, verdes, amarillas, azules o rojas [21].

Pavimentos fríos.

Varios estudios han revisado la literatura sobre la energía solar. reflectancia de muchas superficies pavimentadas estándar y reflectantes, incluidos materiales de pavimentación como el sello de viruta, el revestimiento de lechada y el color de la luz revestimiento [32], [33], [34]. Los estándares actuales de construcción de pavimentos no tienen en cuenta la reflectancia solar de pavimentos. Sin embargo, la temperatura máxima de un pavimento y el rango diurno de temperatura del pavimento es una consideración importante en el diseño de un pavimento. Las pruebas de laboratorio han demostrado que los pavimentos más fríos tienen un tiempo de vida más largo [24], [33], [34].

De acuerdo al comportamiento de enfriamiento de los asfaltos modificados, se observa según [4], que el asfalto convencional conduce menos temperatura a medida que avanza en profundidad en comparación a las muestras de asfalto modificado con pigmentos de color, en este caso rojo y blanco. Como se puede ver en las Figuras 6 y 7, el rojo conduce menos calor a 1000 de flujo (Fig. 7), sin embargo conduce casi la misma proporción de calor que el blanco a 800 de flujo (Fig. 6), con esto se obtienen resultados eficientes, ya que las mezclas modificadas con pigmentos se mantuvieron más frías que las mezclas de asfalto convencional.

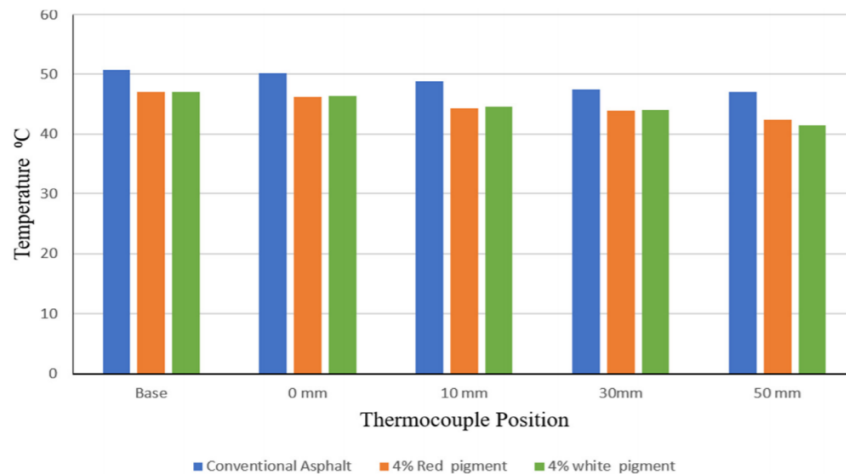


Figura 6. Temperatura máxima a 800 de flujo. Fuente: (Gul Badin, 2020)

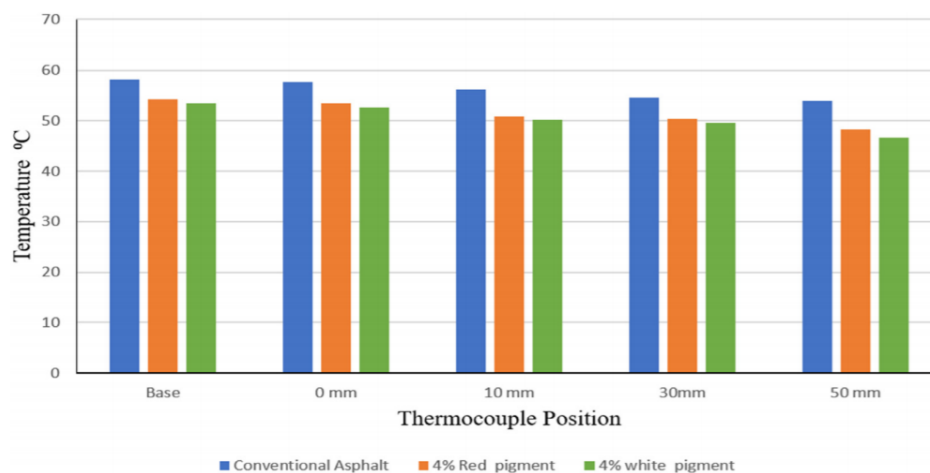


Figura 7. Temperatura máxima a 1000 de flujo. Fuente: (Gul Badin, 2020)

CONCLUSIONES

- Los pavimentos pigmentados muestran mayor resistencia a la radiación solar y la temperatura que los pavimentos convencionales. Todo esto siempre y cuando se llegue a una mezcla con valores óptimos entre asfalto y aglutinantes agregados.
- La coloración que adquiere el pavimento no sólo mitiga la aparición del Efecto Isla de Calor, también incrementa los valores de reflectancia, y en algunos casos las propiedades reológicas con ciertas limitaciones como una mayor probabilidad a una fractura del pavimento.

- Utilizar aglutinantes para pigmentar los pavimentos, es una manera de contribuir a la conservación del medio ambiente y a su vez generar espacios viales visualmente con tonalidades más agradables de las acostumbradas.
- La aplicación de pavimentos pigmentados como tratamientos superficiales, es una opción viable para utilizarlo en estructuras que ya se encuentran construidas y presentan patologías relacionadas con la temperatura. Por ejemplo, en Colombia, en ciudades con altas temperaturas como Girardot o la costa atlántica en general, las temperaturas pueden superar por un gran porcentaje la temperatura para la que fue diseñada una capa asfáltica; si se le aplica el tratamiento, disminuiría la incidencia de la radiación solar sobre la capa y permitiría menor adherencia a los neumáticos mientras se circula por alguna carretera.
- La propiedad cromática de colores distintos al negro o el gris, permite atraer menos los rayos solares y disminuir la temperatura dentro de ciudades con grandes cascos urbanos y que presentan un incremento térmico descontrolado.
- Debido a la reducción de la temperatura en mezclas asfálticas pigmentadas trae beneficios en cuanto a la vida útil de estos pavimentos bajo cargas cíclicas.
- La investigación más detallada de esta nueva tecnología en Colombia, permitiría implementar pavimentos pigmentados en el país y facilitar su producción, distribución y aplicación.

Referencias

- [1] Afroditi Synnefa, T. K. , Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment*, Volume 46, 38-44. 2011
doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>
- [2] Elham Jafari, H. S. Assessment of the Effect of Neyshabur Green Spatial Configuration on the Temperature of Land Surface and Heat Islands. *Open Journal of Ecology*, 7, 554-567, 2017. doi:10.4236/oje.2017.79037
- [3] García, L. , INFLUENCIA DEL COLOR DE LOS PAVIMENTOS EN EL CALENTAMIENTO POR RADIACIÓN TÉRMICA. Girardot, Colombia: Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI), 2018.

- [4] Gul Badin, Naveed Ahmad, Hafiz Muhammad Ali, Experimental investigation into the thermal augmentation of pigmented asphalt, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 551, 123974, 2020
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123974>.
- [5] Sha, A., Liu, Z., Tang, K., & Li, P., Solar heating reflective coating layer (SHRCL) to cool the asphalt pavement surface. *Construction and Building materials*, 139, 355-364, 2017
- [6] Kawther, K. . Colored asphalt and street print are decorating paving in public spaces . *Conference: MATEC Web of Conferences*, 162.
[doi:10.1051/mateconf/201816205027](https://doi.org/10.1051/mateconf/201816205027), 2018
- [7] Wen Xu, R. L. Experimental investigation on preparation and performance of clear asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 19:5, 416-421. [doi:10.1080/10298436.2017.1402602](https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1402602), 2018
- [8] Gil, H.. Efecto del óxido de hierro en las características de la mezcla asfáltica MDC-10. *Ingenio Magno*, Volume 10, 10-22, 2018
- [9] Ioannis Kousis, Claudia Fabiani, Luca Ercolanoni, Anna Laura Pisello, Using bio-oils for improving environmental performance of an advanced resinous binder for pavement applications with heat and noise island mitigation potential, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 39, 2020, 100706, ISSN 2213-1388, 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100706>.
- [10] Huang, Q.; Qian, Z.; Hu, J.; Zheng, D, Evaluation of Stone Mastic Asphalt Containing Ceramic Waste Aggregate for Cooling Asphalt Pavement. *Materials* 2020, 13, 2964, 2020
- [11]. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno, J. Carpio, D. Zamora-Barraza , Influence of early colour degradation of asphalt pavements on their thermal behaviour, *Construction and Building Materials*, Volume 65, Pages 432-439, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.028>
- [12] N. Piérard, J. De Visscher, S. Vansteenkiste, A. Vanelstraete, Coloured asphalt pavements: Mix design and laboratory performance testing, in: F. Canestrari, M.N. Partl (Eds.), 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, RILEM Book Series, Springer, pp. 283–294, 2015.
- [13] Z.G. Xin, Research application of colored asphalt mixture pavement, *Advanced Materials Research*. 900 459–462, 2014,
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.900.459>
- [14] Federico Autelitano, Felice Giuliani ,Daytime and nighttime color appearance of pigmented asphalt surface treatments,*Construction and Building*

Materials, Volume 207, bPages 98-107, 2019,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.100>.

- [15] Mayara S.S. Lima, Liseane Padilha Thives. Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures, Construction and Building Materials, Volume 260, 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119894>.
- [16] Liu, Q .; Varamini, S .; Tighe, S. Field Evaluation of Red-Coloured Hot Mix Asphalt Pavements for Bus Rapid Transit Lanes in Ontario, Canada. Recubrimientos, 7 , 58. 2017. doi:10.3390/coatings7050058
- [17] Thenoux Z., Guillermo Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas chilenas. Santiago, Chile, 2002
- [18] Li, Hui. . Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation. 387, 2012.
- [19] Yu, Xiong , Polymeric thermochromic dye for improvement of asphalt pavement durability, Ohio Department of Transportation; State Job Number 134661 , 2017.
- [20] Pouranian, M.R.; Shishehbor, M. Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review. Environments, 6, 73 , 2019.
<https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- [21] Taborda Calvo, C. E. . Estado del arte de las mezclas asfálticas de colores. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia, 2015
- [22] Ning Shi & Huan Su. Experimental Study on Color Durability of Color Asphalt Pavement, 7 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 207 012104 , doi :10.1088/1757-899x/207/1/012104, 2017.
- [23] Deng-Fong Lin, Huan-Lin Luo , Fading and color changes in colored asphalt quantified by the image analysis method, Construction and Building Materials, Volume 18, Issue 4, Pages 255-261, 2004,
doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.01.004
- [24] Hashem Akbari, H. Damon Matthews, Global cooling updates: Reflective roofs and pavements, Energy and Buildings, Volume 55, Pages 2-6, 2012,
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055>.
- [25] Ping Tang, Liantong Mo, Changlun Pan, Hao Fang, Barugahare Javilla, Martin Riara. Investigation of rheological properties of light colored synthetic asphalt binders containing different polymer modifiers, Construction and Building Materials, Volume 161, Pages 175-185, 2018,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.098>.

- [26] Xiao, Y.; Erkens, S.; Li, M.; Ma, T.; Liu, X. Sustainable Designed Pavement Materials. *Materials*, 13, 1575, 2020, doi:10.3390/ma13071575
- [27] Ariane Middel, V. Turner, F. Schneider, Yujia Zhang and Matthew Stiller. Solar reflective pavements - A policy panacea to heat mitigation?, *Environmental Research Letters*, 2020, doi: 10.1088/1748-9326/ab87d4.
- [28] Chen, Cheng-qin & Zhang, Wei. The Pavement Performance Research on the Powder Colored Asphalt Mixture. *MATEC Web of Conferences*. 95. 01008, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/20179501008.
- [29] P. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno, P. Serrano-Bravo, A. Alonso-Estébanez. Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors, *Applied Energy*, Volume 111, Pages 324-332, 2013 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.013>.
- [30] Tran, N., et al., Strategies for design and construction of high-reflectance asphalt pavements. *Transportation Research Record*, 2009(2098): p. 124-130.
- [31] H. Akbari, S. Menon, A. Rosenfeld, Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂, *Climatic Change* 95 (3–4) .2009, doi:10.1007/s10584- 008-9515-9
- [32] M. Pomerantz, H. Akbari, Cooler paving materials for heat island mitigation, in: *Proceedings of the 1998. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, vol. 9, Pacific Grove, CA, 1998, p. 135.
- [33] M. Pomerantz, H. Akbari, A. Chen, H. Taha, A. Rosenfeld, *Paving Materials for Heat Island Mitigation*, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL38074, Berkeley, CA, 1997.
- [34] L.T. Mo, M. Huurman, M.F. Woldekidan, S.P. Wu, A.A.A. Molenaar, Investigation into material optimization and development for improved ravelling resistant porous asphalt concrete, *Mater. Des.* 31 (7). 2010, 3194–3206.
- [35] Qin, Y. Una revisión sobre el desarrollo de pavimentos fríos para mitigar el efecto isla de calor urbano. *Revisiones de energías renovables y sostenibles*, 52, 445-459, 2015.
- [36] Santamouris M, Synnefa A, Kolokotsa D, Dimitriou V, Apostolakis K . Passive cooling of the built environment e use of innovative reflective materials to fight heat island and decrease cooling needs. *International Journal Low Carbon Technologies*;3(2):71e82.,2008 <https://doi.org/10.1093/ijlct/3.2.71>
- [37] Lee, H. and Kim, Y. Laboratory evaluation of color polymer concrete pavement with synthetic resin binder for exclusive bus lanes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1991, 124–132.,2007.<https://doi.org/10.3141/1991-15>

- [38] Zinzi, M.; Santamouris, M. Introducing Urban Overheating—Progress on Mitigation Science and Engineering Applications. *Climate* , 7, 15.,2019 <https://doi.org/10.3390/cli7010015>
- [39] Santamouris, M., Ban-Weiss, G., Osmond, P., Paolini, R., Synnefa, A., Cartalis, C., Muscio, A., Zinzi, M., Morakinyo, T. E., Ng, E., Tan, Z., Takebayashi, H., Sailor, D., Crank, P., Taha, H., Pisello, A. L., Rossi, F., Zhang, J., & Kolokotsa, D. . Progress in urban greenery mitigation science – assessment methodologies advanced technologies and impact on cities. *Journal of Civil Engineering and Management*, 24(8), 638-671, 2018. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6604>
- [40] Karol J. Kowalski, Jan Król, Piotr Radziszewski, Raquel Casado, Víctor Blanco, Domingo Pérez, Víctor M. Viñas, Yvan Brijse, Mia Frosch, Duy Michael Le, Matt Wayman . Eco-friendly Materials for a New Concept of Asphalt Pavement, *Transportation Research Procedia*, Volume 14, Pages 3582-3591, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.426>.
- [41] Torres Convers, D. E., & Soto Barragán, J. H. . *Mitigación del efecto isla calor mediante el color en los pavimentos* (Doctoral dissertation), 2018.
- [42] Yang, J., Wang, ZH, Kaloush, KE y Dylla, H. . Efecto de las propiedades térmicas del pavimento en la mitigación de las islas de calor urbano: un estudio de caso de modelado de múltiples escalas en Phoenix. *Construcción y medio ambiente*,108, 110-121, 2016.
- [43] Silva, JS, da Silva, RM y Santos, CAG. Impacto espacio-temporal del uso del suelo / cambios en la cobertura del suelo en islas de calor urbanas: un estudio de caso de Paço do Lumiar, Brasil. *Construcción y medio ambiente*, 136, 279-292, 2018.
- [44] Liang, C. F., Wang, H. Y., Lu, J. K., & Chen, H. C. The Investigation of Colored Normal-Temperature Asphalt Concrete. *Advanced Materials Research*, 723, 686–693. , 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.723.686>
- [45] John J. Emery and Peijun Guo and Dieter F.E. Stolle and Jessica Hernandez and Lixin Zhang, Light-coloured grey asphalt pavements: from theory to practice}, *International Journal of Pavement Engineering*, volume 15, number 1, pages 23-35, 2014, publisher Taylor & Francis, doi:10.1080/10298436.2013.782402,
- [46] Golden, J. S., Carlson, J., Kaloush, K. E., & Phelan, P. A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures. *Solar Energy*, 81(7), 872-883 ,2007.
- [47] M. Santamouris, Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments, *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, Volume 26, 2013, Pages 224-240,
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>.

- [48] Federico Rossi, Beatrice Castellani, Andrea Presciutti, Elena Morini, Elisabetta Anderini, Mirko Filipponi, Andrea Nicolini, Experimental evaluation of urban heat island mitigation potential of retro-reflective pavement in urban canyons, *Energy and Buildings*, Volume 126, 2016, Pages 340-352, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.036>.
- [49] Jiao tong bu gong lu ke xue yan jiu suo (China). *Journal of highway and transportation research and development*. Beijing, China: Research Institute of Highway, Ministry of Transport, 2006.
- [50] Ning Xie, Hui Li, Ahmed Abdelhady, John Harvey, Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation, *Building and Environment*, Volume 147, 2019, Pages 231-240, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.017>.