

Pavimentos modificados con pigmentos y su influencia en el microclima urbano

Pavements Modified with Pigments and Their Influence on the Urban Microclimate

Presentación: 8-9/10/2024

Doctorando:

Pablo CABRERA

LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA - Argentina
pcabrera@frlp.utn.edu.ar

Director:

Gerardo BOTASSO

Codirectora:

Ana María CASTRO LUNA

Resumen

Las vías pavimentadas son esenciales para conectar lugares, ciudades o países. Actualmente, el kilometraje total de carreteras en el mundo es de 70 millones de kilómetros. Las calles, rutas y sendas peatonales pueden ser de pavimento asfáltico o de hormigón. En verano, estas superficies se calientan excesivamente por la radiación solar, devolviendo parte del calor al ambiente y aumentando el estrés térmico en los habitantes urbanos. Esto incrementa la temperatura del aire en la ciudad comparada con la región rural circundante, creando una Isla de Calor Urbana (ICU). Modificar la composición de los pavimentos, tanto asfálticos como de hormigón, con pigmentos que aumenten el albedo y tengan alta emisividad del calor absorbido, mejorará la calidad del microclima urbano. Este estudio analiza el comportamiento térmico de muestras densas de pavimento de hormigón y mezcla asfáltica, convencionales y modificadas con pigmentos de óxido de titanio blanco, y óxidos de hierro amarillo y gris. Las muestras se irradiaron con luz solar en el verano de 2024 en La Plata.

Palabras clave: Pavimentos Modificados, Hormigón Coloreado, Mezcla Asfáltica, Albedo, Isla de Calor.

Abstract

Paved roads are essential to connect places, cities or countries. Currently, the total mileage of roads in the world is 70 million kilometers. Streets, routes and pedestrian paths can be made of asphalt or concrete pavement. In summer, these surfaces become excessively heated by solar radiation, returning part of the heat to the environment and increasing thermal stress in urban inhabitants. This increases the air temperature in the city compared to the surrounding rural region, creating an Urban Heat Island (UHI). Modifying the composition of pavements, both asphalt and concrete, with pigments that increase albedo and have high emissivity of absorbed heat, will improve the quality of the urban microclimate. This study analyzes the thermal behavior of dense concrete pavement and asphalt mixture samples, conventional and modified with white titanium oxide pigments, and yellow and gray iron oxides. The samples were irradiated with sunlight in the summer of 2024 in La Plata.

Keywords: Modified Pavements, Colored Concrete, Asphalt Mixture, Albedo, Heat Island.

Introducción

En el mundo desarrollado, se observa un constante desplazamiento de la población hacia los centros urbanos, lo que requiere una conectividad vial adecuada. Para satisfacer esta demanda, el suelo natural ha sido cubierto con pavimentos de mezcla asfáltica o de hormigón, alcanzando actualmente los 70 millones de kilómetros de pavimento en todo el mundo (Jiang et al., 2018).

Estos materiales impermeables, y con alta capacidad de almacenamiento de calor, afectan negativamente el microclima urbano. Los pavimentos impiden la infiltración del agua de lluvia, provocando escorrentías y envejecimiento prematuro de las superficies, especialmente en verano. Las temperaturas superficiales son elevadas debido al bajo albedo y la reducción de la evapotranspiración, lo que hace que el calor almacenado sea sensible en lugar de latente. Esto, junto con las edificaciones, contribuye a la formación de Islas de Calor Urbanas (ICU) (Sreedhar et al., 2016).

Las demandas de sostenibilidad ecológica han aumentado con el desarrollo industrial, y se reconoce que las carreteras son componentes importantes del medio ambiente. Existen dos tipos principales de pavimentos urbanos: mezcla asfáltica y hormigón. La mezcla asfáltica, debido a su color oscuro y bajo albedo¹ (aproximadamente 0.05), absorbe gran parte de la radiación solar, alcanzando temperaturas superficiales de hasta 70 °C en verano. En contraste, el hormigón, con un albedo de alrededor de 0.32, alcanza temperaturas máximas de aproximadamente 45 °C (Cabrera et al., 2023). Esto resulta en una mayor liberación de calor sensible al ambiente, agravando el efecto de las ICU.

Reducir la temperatura superficial de los pavimentos es una solución efectiva para mitigar su contribución a las ICU. Se pueden aplicar recubrimientos reflectivos en la superficie para aumentar la reflectividad de la radiación solar, o modificar la composición del pavimento con pigmentos que incrementen su albedo y emisividad.

Este estudio analiza el comportamiento térmico de pavimentos de mezcla asfáltica y hormigón modificados con pigmentos de óxidos metálicos. Las muestras se expusieron a irradiación solar en el verano de 2024 en La Plata, determinándose la cantidad de calor transferida al medio ambiente.

Desarrollo

Se prepararon seis muestras prismáticas cuadrangulares de 0.3 m x 0.3 m x 0.05 m. Cuatro de ellas son de hormigón H30: una sin modificar (hormigón de referencia) y tres modificadas con un 9% de pigmento (respecto al peso del cemento), usando óxido de titanio blanco, óxido de hierro amarillo y óxido de hierro gris, respectivamente, según la norma ASTM C979. Los pigmentos seleccionados cumplen con las especificaciones de la misma.

Las otras dos muestras son de una mezcla asfáltica tipo CAC D R 12 CA-30: una sin modificar (mezcla asfáltica de referencia) y otra modificada con un 5% de óxido de titanio blanco en relación a la totalidad de su masa.

Se midió la resistencia a compresión de cada hormigón a las edades de 7 y 28 días, mediante el ensayo con probetas cilíndricas de 0.10 m de diámetro y 0.20 m de altura, según la norma IRAM 1546.

El albedo de cada muestra se midió siguiendo la norma ASTM E1918 modificada por Akbari (Akbari et al., 2008), durante un día despejado de enero de 2024, en una zona alejada al estacionamiento de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Se utilizó un piranómetro Kipp&Zonen CMP-3 asociado a un datalogger Campbell Scientific CR300.

Para determinar la emisividad de cada muestra, se utilizó una cámara termográfica Testo 865 con resolución de infrarrojos de 320 x 240 píxeles y una visualización de diferencias de temperatura de 0.1 °C, conforme a la norma ASTM E1933-99a/06.

¹ Cuando la radiación solar incide en el pavimento, una porción de la misma se refleja al ambiente, mientras que el resto es absorbido por el pavimento, la relación de la radiación reflejada a la radiación solar incidente se denomina albedo.

Se determinó el comportamiento térmico de las muestras expuestas al sol usando termocuplas tipo K conectadas a adquirentes de datos. Las temperaturas superficiales de las muestras se registraron durante una exposición de dos días al aire libre. Se calculó la cantidad de energía diaria que liberan los diferentes hormigones al medio ambiente.

Resultados

Las dosificaciones de los hormigones, con los agregados en la condición de saturados y superficie seca, se muestran en la Tabla 1. Por una cuestión de practicidad al hormigón de referencia se lo llamará H30R, y a los hormigones modificados se los llamará de la siguiente manera: hormigón con óxido de titanio, H30-TiO₂, hormigón con óxido de hierro amarillo, H30-FeO-A, y al hormigón con óxido de hierro gris, H30-Fe₂O₃-G.

Materiales	H30	H30-TiO₂	H30-FeO-A	H30-Fe₂O₃-G
Agua	176	176	176	176
Cemento CPC 40	350	350	350	350
Piedra partida granítica 6:20	990	990	990	990
Arena silicea	852	832	831	828
Aditivo superfluidificante	1.4	1.4	2.1	3.2
Pigmento	0	32.1	32.1	32.1
a/c	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabla 1: Dosificación de hormigón de referencia, H30, y hormigones modificados con pigmentos de óxido de titanio, H30-TiO₂, óxido de hierro amarillo, H30-FeO-A, y óxido de hierro gris, H30-Fe₂O₃-G.

Las dosificaciones de las mezclas asfálticas se muestran en la Tabla 2. Al igual que con los hormigones, por una cuestión de practicidad, a la muestra de mezcla asfáltica de referencia se la llamará MAR, y a la mezcla asfáltica modificada con TiO₂ se la llamará MA-TiO₂.

Materiales	MAR	MA-TiO₂
Piedra partida granítica 6:12	38	36
Arena de trituración granítica 0:6	56	53
Cal hidráulica hidratada	1	1
Pigmento	0	5
Asfalto CA-30	5	5

Tabla 2: Dosificación de mezcla asfáltica de referencia, MAR, y mezcla asfáltica modificada con óxido de titanio, MA-TiO₂.

Los valores de resistencia a compresión de las probetas correspondientes a cada tipo de hormigón, a la edad de 28 días, se muestran en la Tabla 3.

Muestra	H30	H30-TiO₂	H30-FeO-A	H30-Fe₂O₃-G
Resistencia / MPa	36.1	35.9	36.3	37.4

Tabla 3: Valores de resistencia a compresión a la edad de 28 días.

Se midieron los valores de albedo y emisividad de todas las muestras, los resultados se muestran en la Tabla 4.

Muestra	Albedo	Emisividad
H30	0.32	0.93
H30-TiO ₂	0.40	0.99
H30-FeO-A	0.25	0.99
H30-Fe ₂ O ₃ -G	0.26	0.99
MAR	0.06	0.91
MA-TiO ₂	0.18	0.99

Tabla 4: Valores de albedo y emisividad medidos en las muestras de pavimento asfáltico y de hormigón.

Se observó que la incorporación del pigmento de óxido de titanio a la mezcla de hormigón aumenta el valor del albedo de la muestra de referencia, mientras que la adición de ambos óxidos de hierro a la mezcla de hormigón lo reduce. Del mismo modo, se observa que la incorporación de los pigmentos mencionados incrementa la emisividad de las muestras.

Análisis de la variación en el tiempo de la temperatura superficial de muestras de pavimento de mezcla asfáltica y pavimento de hormigón modificadas por incorporación de pigmentos

La Figura 1 muestra la variación de la temperatura superficial (T_s) de la muestra de pavimento asfáltico de referencia (MAR) y de pavimento asfáltico modificado con TiO_2 (MA- TiO_2) durante 23 horas de exposición al aire libre en enero de 2023 (a) y enero de 2024 (b). La muestra MA- TiO_2 -2023 presenta una disminución en la T_s , especialmente cuando el Sol está en el cenit, debido a la incorporación de TiO_2 . Tras 12 meses de exposición, ambas muestras disminuyen su T_s debido al envejecimiento y aumento del albedo: MAR de 0.06 a 0.11 y MA- TiO_2 de 0.18 a 0.22. En 2023, la T_s de MA- TiO_2 fue 3.35°C menor que la de MAR, y en 2024 fue 4.01°C menor, indicando que el TiO_2 reduce más la T_s con el envejecimiento.

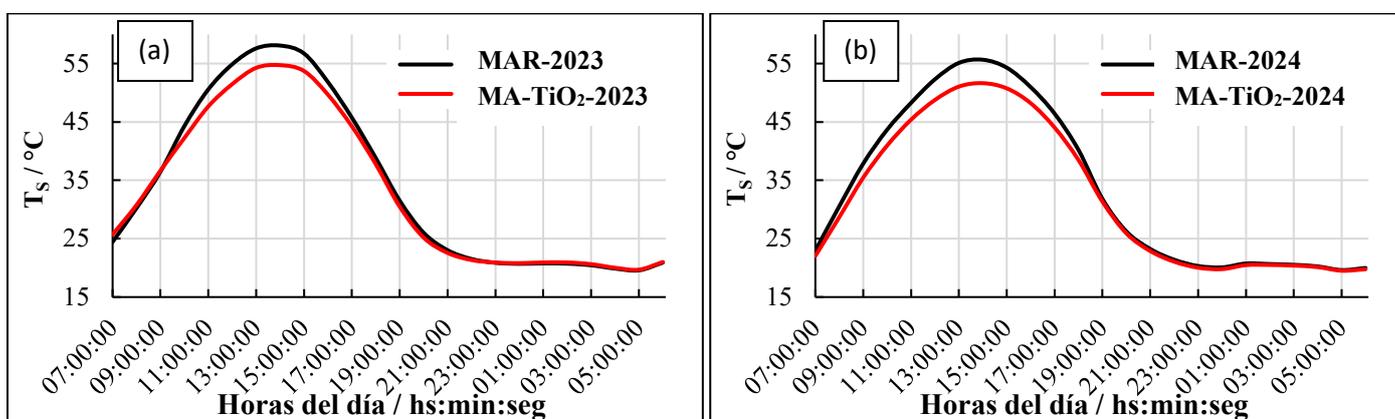


Figura 1: Variación en el tiempo de la temperatura superficial de muestras de pavimento asfáltico sin y con incorporación de TiO_2 , MAR y MA- TiO_2 respectivamente, antes (a) y después (b) de estar expuesta a las condiciones climáticas de la ciudad de La Plata durante un año.

En la Figura 2 se ha graficado la variación de la temperatura superficial (T_s) de las muestras de hormigón, sin y con modificación, expuestas al aire libre durante un período de 23 hs.

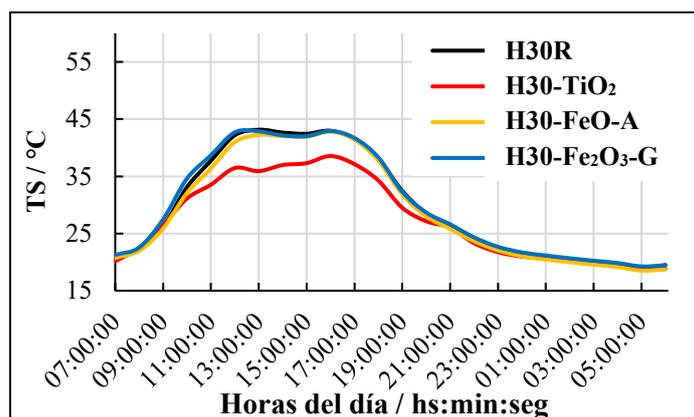


Figura 2: Variación en el tiempo de la temperatura superficial de muestras de pavimento de hormigón, sin y con incorporación de TiO_2 , FeO-A, y Fe_2O_3 -G, al ser expuestas al aire libre por un período de 23 hs.

Se observa que la muestra con agregado de óxido de titanio exhibe la menor T_s , especialmente cuando el Sol está en el cenit ca. 14 h. Este hormigón modificado refleja la mayor cantidad de radiación solar incidente, obteniéndose de este modo, una superficie más fría que la del hormigón de referencia.

Las muestras de hormigón modificadas con pigmentos de óxidos de hierro, amarillo o gris, no contribuyeron a reducir la temperatura superficial medida significativamente, coincidiendo con su menor valor de albedo.

Variación del calor entregado al medio ambiente por cada pavimento analizado

Según Qin (Qin, 2015), en una superficie de pavimento seco, donde la evaporación es insignificante, la absorción de calor radiante solar sobre el pavimento ($Q_{solarabs}$) se expresa según la Ecuación (1):

$$Q_{solarabs} = I(\alpha) \quad (1)$$

donde I es la irradiancia solar incidente [W/m^2] y α es la absortancia del pavimento, calculada de acuerdo con la Ecuación (2)

$$\alpha = 1 - \text{albedo} \quad (2)$$

El pavimento absorbe esta energía y se calienta. La energía absorbida es transferida por conducción, aumentando la temperatura del pavimento. Un cuerpo caliente emite radiación en la región del infrarrojo (IR) del espectro electromagnético. Esta transferencia de calor por radiación depende de la temperatura superficial y la emisividad del material. Si la temperatura superficial del pavimento es mayor que la del aire sobre él, parte de la energía se transfiere al aire por convección. La transferencia de calor al ambiente por convección depende de la temperatura superficial de la muestra caliente, la temperatura del aire circundante y la velocidad del viento sobre la superficie.

El calor transferido desde el pavimento hacia el ambiente circundante será la suma del calor transferido por convección y radiación, expresado como:

$$Q_{transferida} = h_C \cdot (T_S - T_{amb}) + \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_S^4 - T_C^4) \quad (3)$$

h_C [$W/(m^2.K)$] es el coeficiente convectivo que depende de la velocidad del viento según la Ecuación (4); T_S [K] es la temperatura superficial del pavimento; T_{amb} es la temperatura ambiente [K]; σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es $5,67 \times 10^{-8}$ [$W/(m^2.K)$]; ϵ es la emisividad del pavimento y es adimensional, variando sus valores entre 0 y 1; T_C es la temperatura del cielo y se calcula según la Ecuación (5).

$$h_C = 7,2 \times v^{0,78} \quad v \geq 5 \text{ m/s} \quad (4)$$

$$h_C = 5,6 + 4 \cdot v \quad v < 5 \text{ m/s}$$

$$T_C = (0,754 + 0,0044 \cdot T_d)^{0,25} \cdot T_{amb} \quad (5)$$

Donde T_d es la temperatura del punto de rocío.

Aplicando las Ecuaciones (1) a (5), se calculó la energía que entrega al ambiente cada una de las superficies de mezcla asfáltica analizadas. El pavimento modificado, antes y después de su exposición al aire libre, se comparó con la muestra de pavimento asfáltico de referencia.

La cantidad de calor que liberan las muestras de pavimento asfáltico analizadas se muestran en la Tabla 5. Los valores calculados corresponden al calor diario entregado por cada muestra al ambiente.

REFERENCIA 2023	MODIFICADO con TiO ₂ 2023	REFERENCIA 2024	MODIFICADO con TiO ₂ 2024
7546,8 Wh/m ²	7456,7 Wh/m ²	7130,6 Wh/m ²	5579,4 Wh/m ²

Tabla 5: Calor transferido al ambiente por el pavimento asfáltico de referencia y modificado con TiO₂, antes y después de ser expuesto al aire libre por 12 meses.

MES 1	MES 12
1,2%	21,8%

Tabla 6: Reducción porcentual, con respecto a la muestra de referencia, del calor transferido al ambiente por la muestra de pavimento asfáltico con TiO₂, antes y después de ser expuestas al aire libre por 12 meses.

REFERENCIA	MODIFICADA CON TiO ₂
5,5%	25,2%

Tabla 7: Reducción porcentual del calor transferido al ambiente por las muestras de pavimento asfáltico de referencia y modificada con TiO₂, después de ser expuestas al aire libre por 12 meses.

En la Tabla 6 se muestra que existe una reducción porcentual del calor transferido al medioambiente por la variación del albedo en la muestra de pavimento asfáltico por haber incorporado TiO₂, antes y después de ser expuestas al aire libre por 12 meses, demostrando cómo un aumento del albedo contribuye a enfriar el ambiente en torno a la muestra.

En la Tabla 7 se muestra que existe una reducción porcentual del calor transferido al medioambiente, debido al incremento de albedo que las muestras sufren por haber estado expuestas durante 12 meses a las condiciones climáticas presentes en la zona de la UTN FRLP. El pavimento con incorporación de TiO₂ es más claro y disminuye así la capacidad de absorber calor con lo que baja su temperatura superficial mejorando también la calidad del microclima urbano.

Por otro lado, la cantidad de energía que liberan las muestras de hormigón analizadas en la experiencia de insolación, se comparan en la Tabla 8. Los valores calculados corresponden a la energía diaria transferida por cada muestra analizada al medioambiente.

H30R	H30-Fe ₂ O ₃ -G	H30-FeO-A	H30-TiO ₂
5546 Wh/m ²	5598 Wh/m ²	5466 Wh/m ²	3831 Wh/m ²

Tabla 8: Energía transferida al ambiente por cada muestra de hormigón analizada luego de 24 h de exposición al aire libre.

La energía transferida al ambiente por las muestras modificadas con los óxidos de hierro, amarillo y gris, es similar a aquella transferida por la muestra de referencia, mientras que la muestra modificada con óxido de titanio libera al ambiente una cantidad notablemente inferior a las muestras antes mencionadas.

Conclusiones

El agregado de óxido de titanio a la mezcla asfáltica incrementa el valor de albedo que la muestra convencional tiene. Además, cuando las muestras se envejecen, el agregado de TiO₂ sigue favoreciendo a la disminución de la temperatura superficial de la muestra. Esto contribuye a reducir la cantidad de calor que el pavimento asfáltico emite hacia el ambiente.

Las mezclas de hormigón con pigmentos de óxidos de hierro amarillo y gris tienen albedos más bajos que la muestra de referencia, y no disminuyen notablemente la temperatura superficial bajo irradiación solar. En cambio, la adición de óxido de titanio al hormigón convencional aumenta el albedo, resultando en la menor temperatura superficial entre todas las muestras. Esto es positivo para moderar la Isla de Calor Urbana (ICU), ya que la superficie absorbe menos energía y se mantiene más fría que la del hormigón convencional, liberando menos calor hacia el ambiente.

Tanto en el pavimento de hormigón como en el de mezcla asfáltica, el agregado de TiO₂ es el de mayor potencial para reducir la contribución de los pavimentos de hormigón a la ICU.

Referencias

- Alchapar, N., Correa, E., & Cantón, M. (2013). Solar reflectance index of pedestrian pavements and their response to aging. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1 (4), pp. 281-285.
- Akbari, H., Levinson, R., Stern, S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82, pp. 648-655.
- Cabrera, P., Botasso, G., Castro Luna, A. M. (2023). Pavimentos de asfalto y hormigón modificados para mejorar el microclima urbano. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27, pp. 353-362.
- Jiang, W., Huang, Y., & Sha, A. (2018). A review of eco-friendly functional road materials. *Construction and Building Materials*, 191, pp. 1082-1092.

Sreedhar, S., Prapoorna Biligiri, K. (2016). Comprehensive laboratory evaluation of thermophysical properties of pavements materials: effects on urban heat island. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (7), pp. 1-12.

Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, pp. 445-459.