

# ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE SU CONTRIBUCIÓN A LA MODERACIÓN DEL EFECTO ICU

Cabrera, Pablo<sup>1</sup>, Botasso, Gerardo<sup>1</sup>, Castro Luna, Ana<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA

<sup>2</sup>EnAITecS, CODAPLI UTN FRLP

\*castrolu@gmail.com

## RESUMEN.

En las últimas décadas ha existido un desplazamiento continuo de la población rural hacia centros urbanos, los cuales se han modificado por la construcción de numerosas viviendas y vías de acceso, provocando cambios medioambientales importantes. Uno de los factores responsables de estas modificaciones fue la sustitución creciente del suelo natural por otro de mezclas asfálticas. En la ciudad, los pavimentos de las calles impiden la infiltración del agua de lluvia y en verano se calientan por la incidencia de radiación solar, cuando parte de ese calor es devuelto al ambiente. Consecuentemente, la temperatura del aire se eleva en la ciudad con respecto a la región rural circundante, provocando el efecto Isla de Calor Urbano, ICU.

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, mientras mayor es la cantidad de radiación reflejada, menos energía solar absorbe el material. Por su color oscuro, el pavimento de mezcla asfáltica absorbe gran parte de la radiación solar incidente y la almacena como calor. El pavimento caliente emite radiación como cuerpo negro al medio ambiente en la región del infrarrojo del espectro electromagnético. El calor absorbido se transfiere al interior del pavimento por conducción térmica. Existe también un flujo de calor por convección desde la superficie de la muestra caliente al aire circundante.

Usar materiales para pavimentos que tengan mayor albedo y altos valores de emisividad, contribuye a enfriarlo moderando la ICU con reducción de la convección y mejoras en la calidad del medioambiente urbano.

Se realizaron experiencias en el laboratorio usando luz artificial y analizado el comportamiento térmico de muestras de pavimento asfáltico drenante y denso, éste sin y con recubrimiento superficial.

**Palabras Claves:** Pavimentos Modificados, Isla de Calor Urbano, Albedo, Energía Solar

**Área Temática:** ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES: Edificación sustentable; Economía de las energías sustentables; Energía y medio ambiente; Desafíos para las ciudades.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desplazamiento de la población rural a centros urbanos en las últimas décadas, así como la necesidad de viviendas y vías de acceso, han provocado sobre todo en las ciudades, cambios medioambientales importantes por la sustitución creciente del suelo natural por otros de mezcla asfáltica. En la ciudad, los pavimentos de las calles impiden la infiltración del agua de lluvia y especialmente en verano, se calientan por la incidencia de radiación solar y entregan al ambiente parte del calor absorbido. En consecuencia, la temperatura medioambiental, que en la ciudad es más elevada que en la región rural circundante da lugar a lo que se denomina el efecto Isla de Calor Urbano, ICU, Figura 1 [1]. Existen estudios científicos que señalan que en el verano, las temperaturas en la ciudad son varios grados más altas que en el área rural circundante [1, 2]. Los resultados de estas investigaciones muestran que la modificación de los materiales del pavimento y la reducción de la temperatura en la superficie del mismo son esenciales para lograr un balance térmico urbano que ayude a resolver el efecto de la ICU. Este efecto tiene varias consecuencias asociadas tales como: mayor uso de energía de enfriamiento y costos asociados a los aumentos notables en la demanda máxima de energía, existe también, un riesgo creciente para la salud humana, por la formación de grandes cantidades de “smog” y otros contaminantes del aire, que degradan su calidad. Hay un mayor estrés térmico en los residentes y un fuerte impacto en los ecosistemas urbanos. En pocas palabras, los efectos de la ICU derivan en un entorno degradado para el desarrollo de la vida. Además, cuando el pavimento asfáltico convencional incrementa su temperatura se producen fenómenos como el envejecimiento del mismo y su deformación permanente debida a cargas cíclicas [3]. Los pavimentos convencionales de mezcla asfáltica densa son ampliamente utilizados por su buen desempeño vial, bajos costos de mantenimiento y reducción del ruido.

La radiación solar se compone de luz visible (43%), luz IR (52%) y luz ultravioleta (5%). Cuando la radiación solar incide en el pavimento, una porción de la misma se refleja al ambiente, y el resto es absorbida por el pavimento. La relación entre la radiación reflejada y la radiación solar incidente se denomina albedo con un valor que varía entre 0 y 1, según las características de la superficie. Cuanto mayor es su valor, lo que ocurre en superficies claras, menos energía solar absorbe el material. Las superficies de los pavimentos asfálticos son oscuras, con un valor de albedo pequeño, por lo que éstas absorben una porción significativa de la radiación solar incidente. Un pavimento de asfalto convencional tiene una conductividad térmica moderada, por lo que puede transferir calor a su interior, almacenándolo durante las horas de sol, para luego liberarlo al aire durante la noche [4].

En general, la transferencia de calor se puede realizar de tres formas: conducción en sólidos, convección en fluidos y radiación. La transferencia de calor por convección hacia y desde la superficie del pavimento es una función de la diferencia de temperatura entre el aire ambiente y la superficie del pavimento, depende de la velocidad del viento así como del coeficiente de convección de calor. El balance térmico en el pavimento debe tomar en cuenta la cantidad de radiación solar que incide en la superficie, la cantidad de calor que absorbe y transmite a su interior el pavimento, la cantidad de calor que emite por la temperatura que alcanza, y el calor que transfiere al aire. Para moderar la ICU, se ha propuesto, entre otras posibles soluciones, utilizar materiales para pavimento con mayor albedo y menos rugosidad, o modificados para generar estructuras retentivas de humedad, para minimizar la absorción de calor solar por los mismos y lograr un equilibrio térmico urbano aceptable.

En consecuencia, las recomendaciones más interesantes para enfriar los pavimentos se enfocan en modificar los materiales para i) aumentar el albedo, y la emisividad ii) posibilitar el enfriamiento por evaporación.

El albedo es importante para reducir la temperatura de un material durante el día y junto con la emisividad de la superficie caliente influyen en la transferencia de calor por radiación entre el pavimento y el entorno circundante.

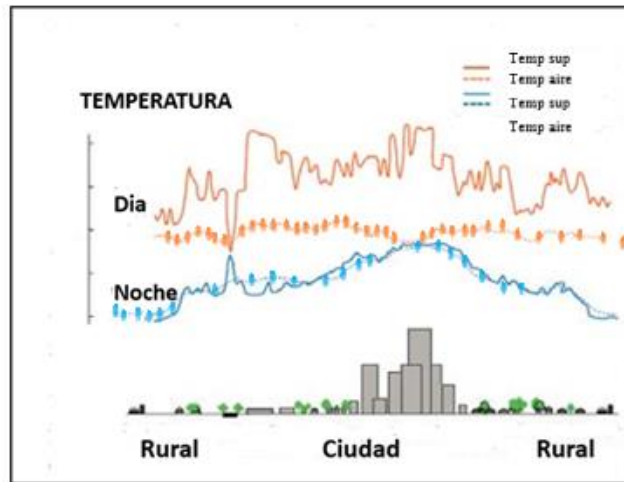


Figura 1 Variación diurna y nocturna de la temperatura superficial del pavimento y la temperatura del aire en la ciudad y las áreas rurales vecinas [5].

En principio, para lograr un pavimento más frío, deberían modificarse parámetros como por ejemplo, el color superficial. Un pavimento más claro por composición o por tratamiento superficial para que parezca de color más claro, tiene mayor albedo. La comparación más común entre el pavimento convencional de asfalto y el de hormigón demuestra que este último tiene una superficie más fría por su color más claro [6]. Hay varias estrategias relacionadas al color, muchas de las cuales simplemente consisten en modificar con materiales de colores más claros las tecnologías de pavimentación existentes. El albedo del hormigón convencional (cemento gris), se puede mejorar aún más mediante el uso de agregados de colores más claros, cemento blanco, aditivos para hormigón, óxido de titanio, etc.

Posibilitar el enfriamiento por evaporación se logra con el uso de pavimentos porosos, o adoquines con vegetación porque así se facilita la evotranspiración que consume calor en el cambio de fase líquido/vapor, que transforma así el agua retenida en vapor. Los pavimentos permeables pueden no ser una opción apropiada en climas secos, donde la disponibilidad de agua es escasa.

Para reducir la conductividad térmica del pavimento se pueden incorporar materiales poco conductores térmicos a la mezcla de material de pavimento así como incrementar su porosidad.

Finalmente, otra opción para aliviar las altas temperaturas del ambiente urbano es plantar a lo largo del camino pavimentado árboles que den sombra [5]. El uso de pavimentos o materiales fríos además del aumento de espacios verdes es una alternativa viable y de bajo costo que se puede implementar en las áreas urbanas como estrategia para reducir los efectos nocivos de las islas de calor.

Todas estas acciones son apropiadas para disipar el calor superficial de un pavimento urbano y del aire medioambiental en la ciudad. Si el pavimento no se calienta, se logra ahorrar energía, así como también mejorar la calidad del aire.

Una de las limitaciones de los materiales reflectantes es el envejecimiento y la suciedad de la superficie, que provocan una disminución del rendimiento como pavimento frío, ya que la acumulación de suciedad, presencia de hongos y degradación del material inducido por la luz, el calor y la humedad, disminuyen el albedo inicial de la superficie bajo estudio. Se han desarrollado métodos de estudio de envejecimiento acelerado para determinar esta evolución antes de la aplicación real [7].

En este trabajo, utilizando luz solar artificial se ha estudiado en el laboratorio la respuesta térmica de muestras de pavimento asfáltico drenante y denso, este último sin y con modificación de color en su superficie. Se han registrado durante tiempo prolongado las temperaturas de las muestras a diferentes profundidades de la probeta usando termocuplas y adquisidores de datos. Se ha medido la emisividad de las muestras y se ha analizado la influencia de diferentes coberturas superficiales en su comportamiento térmico.

## 2. EXPERIMENTAL

Se examina el comportamiento térmico de probetas realizadas con una mezcla asfáltica densa denominada CAC D R 12 AM-3 (Concreto Asfáltico en Caliente; Denso; Rodamiento; tamaño

máximo nominal 12 mm; Asfalto Modificado con polímero tipo 3) sin y con recubrimiento superficial. El recubrimiento superficial de la probeta es una pintura blanca base acuosa con un gran poder de cubrimiento. Al momento de ser utilizada aumenta el albedo del pavimento aproximadamente a 0,7 y posee un efecto aislante en el sentido de que dificulta la salida del calor que el pavimento acumuló mientras fue irradiado. También se analiza una probeta realizada con una mezcla asfáltica drenante denominada CAD 12 AM-3 (Concreto Asfáltico Drenante en Caliente; Rodamiento tamaño máximo nominal 12 mm; Asfalto Modificado con polímero tipo-3) con un porcentaje de poros de 23%.

En las Tablas 1 y 2 se muestra la densidad y dosificación de cada mezcla asfáltica.

Tabla 1 Composición de la Mezcla Asfáltica Densa

CAC D R 12 AM-3	
Densidad	2,290 kg/m <sup>3</sup>
Materiales	Dosificación (%)
Agregado grueso granítico 6:12	38
Cal hidráulica hidratada	2
Arena de trituración granítica 0:6	55,2
Asfalto AM-3	4,8
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Tabla 2 Composición de la Mezcla Asfáltica Drenante

CAD 12 AM-3	
Densidad	1,900 kg/m <sup>3</sup>
Materiales	Dosificación (%)
Agregado grueso granítico 6:12	75
Cal hidráulica hidratada	3
Arena de trituración granítica 0:6	17
Asfalto AM-3	5
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

La irradiación de las muestras se realiza utilizando lámparas UltraVitalux® cuyo espectro de emisión asemeja el de la radiación solar. La potencia que se obtiene utilizando cuatro lámparas es 1200 W. La disposición de las lámparas en cuanto a la distancia que las separa de la superficie de la probeta de mezcla asfáltica utilizada se fija en 0.3 m, que corresponde a una irradiancia de 513 W/m<sup>2</sup> coincidiendo con el valor de irradiancia solar media en la ciudad de La Plata durante un día del mes de enero del año meteorológico típico para la ciudad de La Plata.

La Plata se caracteriza por veranos relativamente calurosos con temperaturas medias comprendidas entre 20-26°C y máximas mayores que 30°C, inviernos no muy fríos con temperaturas medias entre 8-12°C y mínimas que excepcionalmente son inferiores a 0°C. Sus amplitudes térmicas son menores a 14°C a lo largo de todo el año [8]. Bre et al. definen el año meteorológico típico como el que resulta de seleccionar cada mes del calendario típico por separado, y luego concatenar los 12 meses típicos para construir el año típico.

Durante los períodos de calentamiento y enfriamiento de las probetas, se mide en diferentes puntos del interior de la misma, la temperatura de la muestra en función del tiempo, utilizando termocuplas tipo K y almacenadores de datos. Para determinar la emisividad de cada muestra de pavimento, se utiliza una cámara termográfica Testo 865 con una resolución de infrarrojos de 320 x 240 píxeles y una visualización de diferencias en la temperatura de 0.1 °C.

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1. Comportamiento térmico de las mezclas asfálticas

La variación de la temperatura con el tiempo a diferentes profundidades se muestra usando una probeta CAC D R 12 AM-3, densa, Fig. 2 - a y una probeta CAD 12 AM-3, drenante, Fig. 2 - b. Las probetas son tipo Marshall, con dimensiones de un prisma cilíndrico de 10 cm de diámetro y 6 cm de alto. Se observa en ambas muestras que las curvas de variación de la temperatura con el tiempo son crecientes en las primeras horas de calentamiento y que a tiempos largos, la temperatura alcanza un valor casi constante.

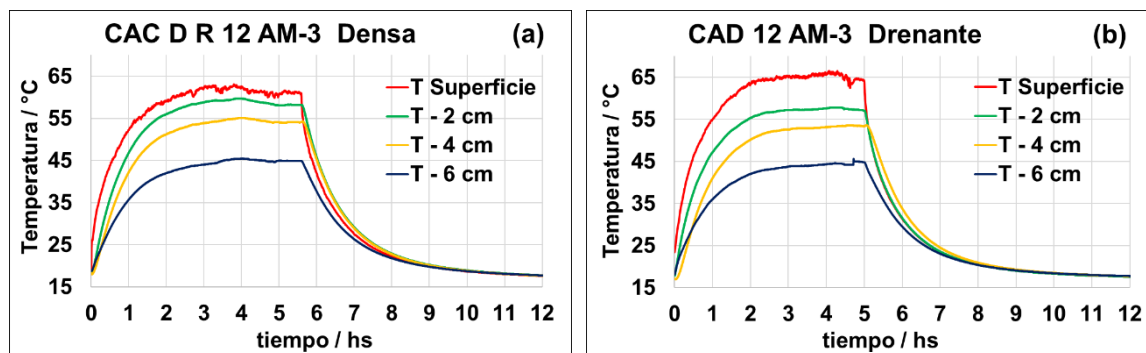


Figura 2 Curvas de variación de temperatura en (a) la mezcla asfáltica CAC D R 12 AM-3, densa y en (b) la mezcla asfáltica CAD 12 AM-3, drenante durante el calentamiento y el enfriado de las mismas.

Se observa que la muestra drenante, CAD 12 AM-3, alcanza una temperatura superficial final mayor que la alcanzada por la muestra densa, CAC D R 12 AM-3. Si además se comparan los valores de temperatura alcanzada en el interior de la muestra, se aprecia que los valores de temperatura alcanzados a 2 y 4 cm de profundidad en la probeta drenante son inferiores a los alcanzados en la probeta densa. De acuerdo a los parámetros indicados en las Tablas 1 y 2, la muestra densa y la muestra drenante tienen también diferente densidad y porosidad. El calentamiento de la muestra densa hacia el interior muestra un comportamiento típico para pavimentos con buena conductividad e inercia térmica [9,10]. Las propiedades térmicas del pavimento tales como: conductividad térmica, capacidad calorífica, difusividad térmica, influyen en la transferencia de calor por conducción dentro de la estructura del pavimento. La mayor conductividad térmica de la superficie del pavimento ayuda a la rápida transmisión del calor del pavimento al suelo y viceversa. El comportamiento térmico descrito en la Fig. 2 b es coincidente con el de materiales de conductividad térmica baja como es el caso de la muestra drenante analizada [9]. Además, una magnificación de las curvas de enfriamiento permite observar un descenso menos abrupto de la temperatura con el tiempo en la probeta densa, denotando la mayor inercia térmica de la misma que puede relacionarse con la mayor lentitud con que el cuerpo caliente entrega ese calor al medio ambiente.

### 3.2 Influencia de recubrimiento superficial en la muestra de mezcla asfáltica densa

En la Fig.3 se exhibe el comportamiento térmico de la muestra CAC D R 12 AM-3 densa sin y con recubrimiento superficial claro, se han utilizado probetas de forma prisma cuadrangular con dimensiones de 30cm x 30cm x 3cm. La muestra densa sin recubrimiento exhibe la mayor temperatura superficial durante el calentamiento y alcanza un valor constante cuando se calienta por tiempo prolongado, en el enfriamiento exhibe también la mayor temperatura superficial en referencia a las muestras con recubrimiento claro. Las muestras densas con un recubrimiento claro muestran una notable disminución de la temperatura superficial máxima alcanzada durante el calentamiento lo que se atribuye a un mayor albedo y una menor absorción de energía solar al interior de la muestra.

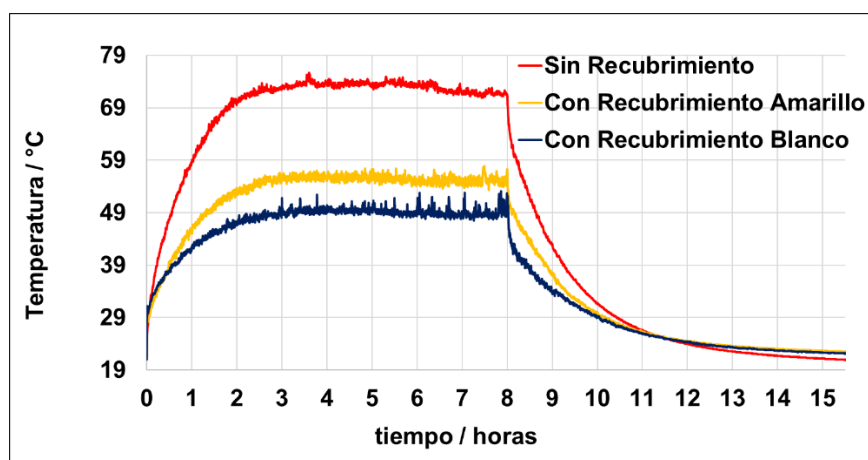


Figura 3 Variación de temperatura superficial de probetas CAC D R 12 AM-3 densas sin recubrimiento (roja) y con recubrimiento (amarillo) y (blanco), durante el calentamiento y el enfriamiento.

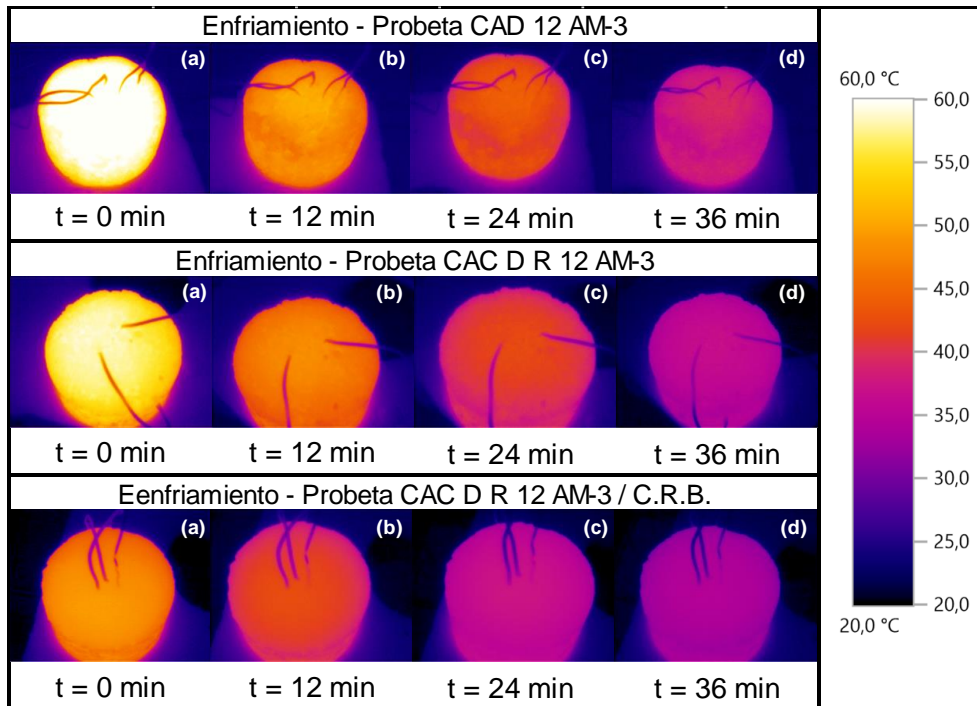


Figura 4 Imágenes termográficas durante la etapa de enfriamiento de las muestras estudiadas a tiempos de enfriamiento iguales.

En la Fig. 4, se muestran imágenes termográficas del descenso de la temperatura de la probeta drenante CAD 12 AM-3, y de las probetas CAC D R 12 AM-3 densas, sin y con recubrimiento blanco durante la etapa de enfriamiento. Es interesante observar la coloración de las probetas durante esa etapa al inicio la muestra drenante tiene en la superficie el color más claro de la escala, evidencia de una mayor temperatura superficial, a medida que transcurre el tiempo las muestras se van oscureciendo virando el color del naranja al violeta.

Con el objetivo de observar la influencia de la probeta prisma cuadrangular caliente en el comportamiento del aire sobre la superficie de las muestras, durante el enfriamiento de las mismas en la etapa de apagado, se muestra en la Figura 5, la variación de la temperatura del aire a 5 cm sobre la superficie que se enfría.

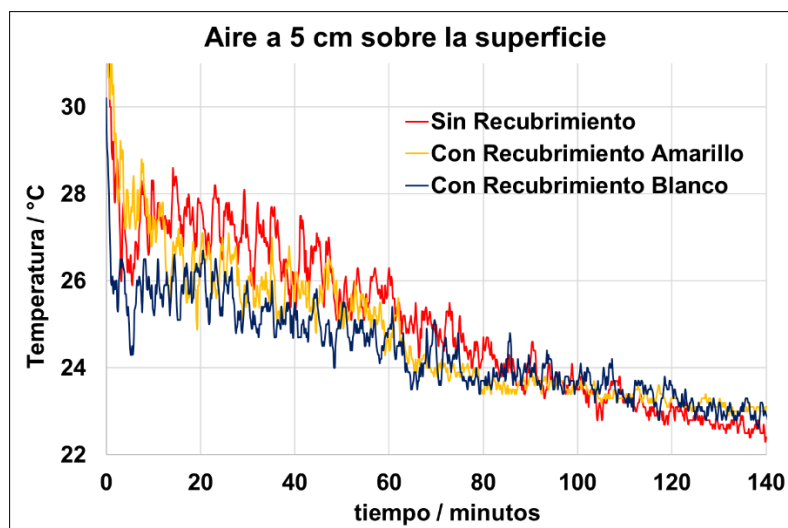


Figura 5 Variación de la temperatura del aire durante el enfriamiento de la probeta sin y con recubrimiento de color a 5 cm de la superficie.

Se observa de acuerdo a la variación de la temperatura del aire, que la liberación de calor al ambiente es menor en las muestra con recubrimiento claro, coincidente con la menor cantidad de calor acumulada durante el calentamiento de las probetas.

### 3.3 Cálculo de la emisividad

La emisividad ( $\epsilon$ ) mide la capacidad de la superficie de un material para liberar como radiación infrarroja el calor absorbido. Este parámetro especifica qué tan bien la superficie analizada emite radiación térmica en comparación con un cuerpo negro que opere a la misma temperatura.

La emisividad ( $\epsilon$ ) tiene un valor variable entre 0 y 1. Se han realizado varios estudios para demostrar el efecto de la emisión sobre el comportamiento térmico de los materiales utilizados en el entorno urbano. [11,12]. Existe una correlación acentuada entre la temperatura superficial nocturna promedio y el tipo de material usado en pavimentos [5].

Para determinar la emisividad de cada una de las muestras que se analizan, se utiliza la cámara termográfica Testo con ajuste de emisividad, y una termocupla tipo K de Níquel Cromo – Níquel. Se registra simultáneamente la temperatura superficial de la muestra bajo estudio con la termocupla tipo K, mientras que con la cámara termográfica se ajusta la emisividad hasta que la temperatura indicada por ella coincide con la registrada por la termocupla.

En la Tabla 3 se muestran las temperaturas superficiales y los valores de emisividad de las muestras densas CAC D R 12 AM-3 sin y con recubrimiento, luego de ser irradiadas por tiempo prolongado.

Tabla 3 Valores de emisividad de las probetas densas, CAC D R 12 AM-3, sin y con recubrimiento.

CAC D R 12 AM-3		CAC D R 12 AM-3 Amarilla		CAC D R 12 AM-3 Blanca	
Temperatura	Emisividad ( $\epsilon$ )	Temperatura	Emisividad ( $\epsilon$ )	Temperatura	Emisividad ( $\epsilon$ )
64,4 °C	0,91	52 °C	1	44 °C	1

La emisividad medida para las muestras, que se exhiben en la Tabla 3, demuestra que las probetas con recubrimiento claro, emiten la radiación infrarroja de modo más eficiente ya que su comportamiento es el de un cuerpo negro.

#### 4. CONCLUSIONES.

1 – Cuando se calienta con luz solar artificial una probeta de pavimento asfáltico CAC D R 12 AM-3 densa y una probeta de pavimento asfáltico CAD 12 AM-3, drenante, se alcanza una mayor temperatura en la probeta con pavimento drenante. Una muestra drenante con una porosidad mayor es menos conductora térmica, acumula calor en superficie, dificulta la transferencia de calor al interior y tiene una inercia térmica más baja que la muestra densa.

2 – Una probeta de mezcla asfáltica densa CAC D R 12 AM-3 con recubrimiento superficial claro y mayor albedo, alcanza al calentarla por tiempos prolongados, menores temperaturas superficiales que al realizar la misma acción en la muestra descubierta tanto en la superficie como en su interior. Se logra un pavimento más frío en comparación con uno sin recubrimiento claro.

3 – La emisividad de las muestras es determinante para lograr pavimentos más fríos como surge al analizar probetas con recubrimiento superficial claro. De acuerdo a los valores de  $\epsilon$  la muestra con recubrimiento claro, mostrado en la Tabla 3, su comportamiento es muy próximo al de un cuerpo negro a esa temperatura por lo que emite radiación IR con mayor eficiencia.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.
- [2] Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445-459.
- [3] Gago, E. J., J. Roldan, R. Pacheco-Torres, and J. Ordonez. (2013) The City and Urban Heat Islands: Review of Strategies to Mitigate Adverse Effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, , pp. 749–758.
- [4] Yinghong Q. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 445-450.
- [5] Akbari, H.; Bell, R.; Brazel, T.; Cole, D.; Estes, M.; Heisler, G.; Hitchcock, D.; Johnson, B.; Lewis, M.; Mcpherson, G.; et al. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*; EPA: Washington, DC, USA, 2008.

- [6] Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy* 84, 3085-3102.
- [7] 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), 281-285.
- [8] Bre F, García Santa Cruz M; Fachinotti V (2017) Generación del año meteorológico típico para la ciudad de La Plata, Argentina XIV ENCAC Encontro Nacional do Conforto no Ambiente, X ELACAC Encontro Latinoamericano do Conforto no Ambiente, Balneario Camboriu Brasil 17 septiembre.
- [9] Hassn A., Chiarelli A., Dawson A., Garcia A. (2015). Thermal properties of asphalt pavements under dry and wet conditions. *Materials Design*. doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.116.
- [10] Xie, N., Wang, H., & Feng, D. (2015). Coating materials to increase pavement Surface reflectance. *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs (13-35)*. Woodhead Publishing
- [11] Abbas Mohajerani , Jason Bakaric, Tristan Jeffrey-Bailey (2017) The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete *Journal of Environmental Management* 197, 522-538
- [11] Synnefa, A.; Santamouris, M.; Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy* 80, 968-981.

### **Agradecimientos**

PC agradece la beca doctoral otorgada por CONICET, AMCL es investigadora científica de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, CICIPBA. Los autores agradecen el soporte financiero de UTN-FRLP y de CICIPBA.