



Evaluación de temperaturas de colocación de mezclas asfálticas en caliente mediante termografía infrarroja

Evaluation of hot-mix asphalt placement temperatures using infrared thermography

Avaliação de temperaturas de colocação de mistura asfáltica a quente utilizando termografia de infravermelhos

Einstein Enmanuel Andrade-Fernandez ^I
eandrade8763@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-5405-8163>

Eddy Josue Salinas-Hidalgo ^{II}
esalinas8819@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-0431-460X>

Eduardo Tejeda-Piusseaut ^{III}
eduardo.tejeda@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0589-9989>

Correspondencia: eandrade8763@utm.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 03 de junio de 2024 * **Aceptado:** 25 de julio de 2024 * **Publicado:** 30 de agosto de 2024

- I. Estudiante, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Departamento de Construcciones Civiles, Ecuador.
- II. Estudiante, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Departamento de Construcciones Civiles, Ecuador.
- III. Docente, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Departamento de Construcciones Civiles, Ecuador.

Resumen

El control de la temperatura en las mezclas asfálticas en caliente, desde su fabricación en la planta hasta la pavimentación, es esencial para garantizar el buen comportamiento de la capa asfáltica y evitar deterioros prematuros durante su periodo de servicio. En esta investigación, se seleccionó un tramo de carretera en construcción para evaluar la temperatura de la mezcla asfáltica utilizando una cámara termográfica modelo FLUKE TiS65-18060670, para capturar imágenes térmicas durante la extensión y compactación de la mezcla. La cámara termográfica detecta la radiación emitida por la mezcla y la convierte en una imagen visible, mediante patrones de colores que reflejan las diferentes variaciones de temperatura presentes en los objetos sin necesidad de contacto físico, haciendo de este un procedimiento no destructivo. Esto permitió identificar y comparar variaciones de temperatura en disímiles momentos del proceso. Se propone un procedimiento para el análisis de las variaciones térmicas, mediante las imágenes capturadas durante la pavimentación; las mismas que, proporcionaron los datos de temperatura necesarios para crear gráficos de frecuencia y determinar los porcentajes de incumplimiento con las regulaciones, comparando las temperaturas con los valores recomendados en cada etapa de lo pertinente a la investigación.

Palabras clave: Termografía infrarroja; pavimentación; mezcla asfáltica en caliente; temperatura de la mezcla.

Abstract

Temperature control in hot asphalt mixes, from their manufacture in the plant to paving, is essential to ensure the good performance of the asphalt layer and avoid premature deterioration during its service period. In this research, a section of road under construction was selected to evaluate the temperature of the asphalt mix using a FLUKE TiS65-18060670 thermal imaging camera, to capture thermal images during the spreading and compaction of the mix. The thermal imaging camera detects the radiation emitted by the mix and converts it into a visible image, through color patterns that reflect the different temperature variations present in objects without the need for physical contact, making this a non-destructive procedure. This allowed to identify and compare temperature variations at different times of the process. A procedure is proposed for the analysis of thermal variations, using images captured during paving; These provided the temperature data

necessary to create frequency graphs and determine the percentages of non-compliance with regulations, comparing temperatures with recommended values at each stage of the investigation.

Keywords: Infrared thermography; paving; hot mix asphalt; mix temperature.

Resumo

O controlo da temperatura em misturas asfálticas quentes, desde o fabrico na central até à pavimentação, é essencial para garantir o bom desempenho da camada asfáltica e evitar a deterioração prematura durante o seu período de serviço. Nesta investigação foi selecionado um troço de estrada em construção para avaliar a temperatura da mistura asfáltica utilizando uma câmara termográfica modelo FLUKE TiS65-18060670, para captar imagens térmicas durante o espalhamento e compactação da mistura. A câmara termográfica deteta a radiação emitida pela mistura e converte-a em imagem visível, utilizando padrões de cor que refletem as diferentes variações de temperatura presentes nos objetos sem necessidade de contacto físico, tornando este um procedimento não destrutivo. Isto permitiu identificar e comparar variações de temperatura em diferentes momentos do processo. É proposto um procedimento para análise das variações térmicas, utilizando imagens captadas durante a pavimentação; os mesmos que forneceram os dados de temperatura necessários para criar gráficos de frequência e determinar as percentagens de incumprimento da regulamentação, comparando as temperaturas com os valores recomendados em cada etapa pertinente à investigação.

Palavras-chave: Termografia infravermelha; pavimentação; mistura asfáltica a quente; temperatura da mistura.

Introducción

Un pavimento flexible típico, está compuesto por varias capas que trabajan en conjunto para proporcionar resistencia estructural y durabilidad. La capa superior está formada por una mezcla asfáltica comúnmente colocada y compactada en caliente, diseñada para resistir el desgaste causado por el tráfico vehicular. Debajo de esta capa se encuentra la capa de base, que proporciona soporte estructural adicional. Más abajo está la subbase, ambas compuestas por materiales granulares como grava o piedra triturada, que distribuyen las cargas del tráfico y proporcionan estabilidad. Eventualmente, puede haber una capa de mejoramiento, cuya función es mejorar la calidad de la subrasante, el suelo natural sobre el cual se construye todo el pavimento.

En la construcción moderna de carreteras, la pavimentación con mezclas asfálticas en caliente, destaca por su resistencia y capacidad para soportar las inclemencias del clima y el tráfico vehicular intenso. Esta mezcla se produce en una planta de mezcla asfáltica en caliente, donde los agregados y el asfalto se calientan a altas temperaturas. Este proceso asegura que el asfalto sea fluido y maleable durante su manipulación y compactación en el sitio de obra, lo cual facilita una mejor integración con los agregados y una compactación eficaz, resultando en un pavimento más resistente y duradero.

Es crucial que, al llegar a la obra, la temperatura de la mezcla cumpla con los valores especificados para garantizar una compactación adecuada. Durante la colocación, mantener una viscosidad óptima es fundamental para facilitar la manipulación y compactación eficiente. Esto permite que los rodillos compactadores eliminen los vacíos de aire y densifiquen la mezcla, asegurando la adherencia entre los agregados y el ligante asfáltico, esencial para la durabilidad del pavimento. Una temperatura demasiado baja puede comprometer esta adherencia y afectar la calidad del pavimento [1].

El control de la temperatura en la mezcla se lleva a cabo tanto antes como durante la puesta en obra. Durante el transporte de la mezcla, se toman diferentes puntos de medición de temperatura antes de cargarla en los camiones; asegurando así, que salga de la planta a la temperatura correcta. En el sitio de colocación, se mide la temperatura de la mezcla al llegar y justo antes de su colocación y compactación. Es común realizar mediciones periódicas de temperatura durante todo el proceso de transporte y colocación, para garantizar que la mezcla se mantenga dentro del rango de temperatura adecuado [1,2,7].

Usualmente, se emplea un termómetro especializado para controlar la temperatura en la mezcla. Sin embargo, este método proporciona mediciones puntuales y no garantiza la detección de diferencias térmicas en toda el área de la mezcla extendida. Por lo tanto, se requieren técnicas que permitan inspeccionar de manera efectiva y extensa. En este sentido, la termografía infrarroja se presenta como una alternativa viable, ya que no requiere contacto directo con el objeto inspeccionado y puede llevarse a cabo a diferentes distancias [3].

En un pavimento en operación, esta metodología puede ser útil para detectar anomalías invisibles y revelar secciones afectadas, aunque no especifica el tipo, ni la extensión del daño. Para abordar este aspecto, se requiere una inspección detallada donde otros estudios y pruebas puedan precisar la naturaleza y el alcance del daño, interpretado a través de la colorimetría de un termograma [3].

Para monitorear y controlar estas temperaturas, se puede considerar el uso de técnicas avanzadas como la termografía infrarroja, que permite realizar evaluaciones precisas y no destructivas de la temperatura de la mezcla asfáltica en tiempo real. En este estudio/investigación, se emplea esta técnica para analizar las diferencias de temperatura en la mezcla extendida durante la pavimentación y compactación.

El objetivo principal de esta investigación, es evaluar las temperaturas en la mezcla asfáltica durante distintos momentos: antes de la colocación, durante la colocación y después de la compactación. Se busca detectar diferencias y asegurar el cumplimiento de las normativas específicas en cada fase del proceso. Además, se realiza una evaluación estadística para determinar los porcentajes de incumplimiento con dichas regulaciones.

Controles de temperatura de las mezclas asfáltica en caliente

Una vez extendida la mezcla asfáltica, el proceso de compactación se divide en tres etapas claves para asegurar la calidad y durabilidad del pavimento. La fase primera consiste en la compactación inicial sin vibración, que tiene como objetivo principal eliminar el aire atrapado y mejorar la densidad de la mezcla recién colocada. La fase intermedia, utiliza vibración para aumentar aún más la densidad de la mezcla y corregir posibles defectos, como huecos o áreas mal compactadas. Finalmente, la fase tres, emplea un rodillo de acabado o compactador de terminado, para alcanzar la densidad final deseada y proporcionar una superficie lisa y uniforme. Estos rodillos pueden incluir características especiales, como rodillos de neumáticos lisos, que son crucialmente importantes para el resultado final del pavimento.

La falta de compactación adecuada y la baja adherencia, pueden aumentar el riesgo de formación por defectos en el pavimento; tales como, fisuras, baches y desprendimientos prematuros. Por lo tanto, es fundamental mantener la temperatura adecuada durante todo el proceso de colocación y compactación. La temperatura de la mezcla asfáltica al momento de la colocación, es un factor crítico que impacta directamente en la calidad final del pavimento. Las temperaturas especificadas, pueden variar según el tipo de asfalto y las especificaciones del proyecto, pero generalmente, este material se mezcla entre 150°C y 180°C. Al llegar a la obra, la temperatura de colocación generalmente oscila entre 120°C y 150°C, para asegurar la adecuada manipulación y compactación. Es esencial iniciar la compactación, cuando la mezcla aún está a una temperatura mínima de aproximadamente 120°C para mantener su maleabilidad y facilitar la eliminación de vacíos de aire.

Además, durante la compactación, la temperatura no debe caer por debajo de los 85°C, para garantizar que la mezcla conserve su cohesión y capacidad de adherencia necesarias para un pavimento de calidad.

En resumen, el control preciso de la temperatura durante todo el proceso de pavimentación, es esencial para lograr un pavimento asfáltico duradero y de alto rendimiento, capaz de resistir las demandas del tráfico y las condiciones ambientales adversas a lo largo de su vida útil planificada. Si la temperatura de la mezcla asfáltica cae por debajo de 85°C, antes de completar la compactación, se generan efectos adversos significativos que comprometen la calidad del pavimento. En primer lugar, la mezcla se vuelve más rígida y menos maleable, lo cual dificulta su adecuada compactación. Esto puede resultar en una menor densidad de la mezcla y, por consiguiente, una disminución en la resistencia estructural del pavimento. Además, el enfriamiento prematuro puede provocar la segregación de los materiales; es decir, la separación de los agregados y el ligante asfáltico, lo cual conduce a una distribución no uniforme en la capa de pavimento. Esta falta de uniformidad reduce la resistencia y la durabilidad del pavimento a lo largo del tiempo.

A temperaturas más bajas, el ligante asfáltico también puede perder capacidad de adherencia, tanto a los agregados como a la base subyacente, lo que afecta negativamente la integridad estructural y la capacidad de resistir las cargas del tráfico.

Para garantizar la calidad del pavimento, se llevan a cabo pruebas y ensayos de control de calidad, que verifican la densidad, uniformidad y otras propiedades técnicas. Estos controles son fundamentales para asegurar que el pavimento cumpla con las especificaciones técnicas y sea capaz de soportar las condiciones de servicio esperadas.

En Ecuador, la normativa técnica para la construcción de carreteras está regida por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). La norma específica INEN 2215: "Pavimentos Flexibles - Especificaciones Generales", establece los requisitos técnicos y procedimientos para la construcción de carreteras flexibles en el país. Esta normativa abarca desde los criterios de diseño hasta los aspectos de construcción, mantenimiento y control de calidad de los pavimentos flexibles; los cuales están compuestos principalmente por capas de mezclas asfálticas y materiales granulares. La aplicación de estas normas, garantizan la durabilidad, seguridad y funcionalidad de las carreteras a lo largo de su vida útil.

La termografía infrarroja en los estudios de pavimentos asfálticos

Desde el descubrimiento de la radiación infrarroja por William Herschel en 1800 y el efecto termoeléctrico por Thomas Johann Seebeck en 1821, la termografía se ha establecido como una técnica crucial en la detección y análisis de variaciones de temperatura en objetos, superficies y áreas específicas. Esta tecnología permite generar imágenes térmicas, conocidas como termogramas, utilizando la radiación infrarroja emitida por los objetos [11].

La cámara termográfica, cuyo desarrollo se atribuye a William E. Fox y Milo C. Sweatt en 1929, con su dispositivo "Radiometric Infra-Red Photography System", marcó un hito en la evolución de las imágenes térmicas. Desde entonces, esta tecnología ha evolucionado significativamente, ampliando su aplicación en diversas áreas, incluida la inspección de pavimentos asfálticos.

La radiación térmica es un tipo de emisión electromagnética que está asociada con la transferencia de calor y se expresa como resultado de las transiciones de energía de moléculas, átomos y electrones. La intensidad de esta radiación emitida por un cuerpo, depende directamente de su temperatura superficial. Por lo tanto, todo cuerpo cuya temperatura esté por encima del cero absoluto, emitirá radiación infrarroja [4].

Entre las técnicas disponibles para detectar anomalías en pavimentos asfálticos, la termografía infrarroja destaca como una de las más efectivas. A diferencia de otras técnicas, que solo son aplicables cuando los defectos están avanzados o presentan manifestaciones superficiales evidentes; es aquí cuando, la termografía infrarroja permite identificar problemas potenciales durante la instalación de los pavimentos. Esto facilita la intervención temprana y la implementación de soluciones de restauración preventivas, lo cual puede resultar en ahorros significativos de costos a largo plazo.

Las investigaciones sobre el uso de la termografía infrarroja en pavimentos, se han centrado principalmente en la detección anticipada de anomalías en pavimentos asfálticos. Esta técnica se destaca por ser una de las más eficaces, ya que muchas otras técnicas, solo son aplicables cuando los defectos están avanzados y tienen manifestaciones superficiales. Sin embargo, actualmente no existe una metodología adecuada para el monitoreo continuo durante la instalación de los pavimentos, que permita proponer soluciones de restauración preventivas con menores costos [2]. En la práctica, una cámara termográfica captura esta radiación infrarroja en forma de patrones de calor, los cuales se convierten en imágenes visibles que muestran diferencias de temperatura en colores. Estos patrones permiten identificar fácilmente, áreas de calor o frío anormal, indicativos

de posibles problemas o irregularidades en los pavimentos asfálticos. Los colores del termograma están directamente relacionados con la temperatura de los objetos, ya que todos emiten energía en forma de radiación térmica debido a su temperatura [11].

La emisividad es una propiedad de los materiales que indica su capacidad para emitir energía radiante en forma de radiación térmica, expresada como un número entre 0 y 1. Un valor cercano a 0 indica que el material refleja la mayor parte de la radiación incidente y emite poca radiación, mientras que un valor cercano a 1 indica que el material absorbe casi toda la radiación incidente y emite una cantidad proporcionalmente mayor de radiación. En la construcción de pavimentos asfálticos, los materiales comúnmente tienen coeficientes de emisividad que varían entre 0.90 y 0.96, donde el factor 1, representa un material completamente oscuro. El valor de emisividad utilizado en las mediciones, es crucial, porque afecta significativamente la precisión de las mediciones de temperatura realizadas por cámaras termográficas.

La emisividad de diferentes materiales, debe medirse o conocerse con precisión, para asegurar lecturas precisas de temperatura, mediante termografía infrarroja [5]. Varios estudios han resaltado cómo factores relevantes la condición superficial del material; su color y contenido de humedad, pueden afectar la emisividad. Por lo tanto, es crucial considerar un valor adecuado de emisividad durante las mediciones prácticas.

La tecnología de cámaras termográficas se basa en la detección y medición de la radiación infrarroja emitida por los objetos, siendo menos destructiva para el análisis de pavimentos asfálticos, en comparación con otras técnicas que requieren daños y toma de muestras, lo cual podría afectar la homogeneidad y resistencia de la mezcla.

Metodología

Para llevar a cabo la investigación en curso, se aplicaron métodos prácticos fundamentales. Durante la producción y colocación del pavimento, se realizaron mediciones de temperatura en múltiples etapas claves del proceso. Esto incluyó, la toma de datos en la planta de asfalto para verificar la temperatura inicial de la mezcla; así como, mediciones adicionales en los camiones de transporte y en la pavimentadora, antes de la colocación final.

Posteriormente, se utilizó una cámara infrarroja para capturar imágenes térmicas detalladas de las capas asfálticas analizadas. Estas imágenes fueron cruciales para identificar y comparar las variaciones de temperatura en diferentes secciones del pavimento. El análisis de estas temperaturas

emitidas por las capas asfálticas, proporcionó datos significativos sobre la uniformidad térmica y la distribución del calor durante el proceso de pavimentación.

En resumen, la combinación de mediciones directas y el uso de tecnología de termografía infrarroja, fueron fundamentales para la recopilación de datos precisos y la evaluación detallada de las condiciones térmicas durante la ejecución del pavimento asfáltico.

Se seleccionó un tramo específico dentro de una obra vial en construcción, donde se cimenta la superficie, con una mezcla asfáltica en caliente. Para realizar estas mediciones, se utilizó la cámara termográfica modelo FLUKE TiS65-18060670, siguiendo los siguientes criterios:

1. Se midió la temperatura de la mezcla asfáltica a la salida de la planta, para establecer un patrón de referencia para las siguientes mediciones con la termografía.
2. A la llegada a la obra se tomaron mediciones de temperatura nuevamente, antes de su aplicación en el pavimento.
3. Durante la aplicación, utilizando una cámara termográfica, se realizaron mediciones continuas de temperatura de la mezcla asfáltica, mientras era extendida por la pavimentadora.
4. Se monitoreó la temperatura durante el proceso de compactación, para asegurar que se mantuviera su calidad dentro de los rangos específicos, adecuados y efectivos; tal como, lo estiman los resultados especificados.
5. Finalmente, se tomaron nuevas mediciones con la cámara termográfica, para evaluar la temperatura de la mezcla, una vez completado el proceso de pavimentación y compactación.

Estas mediciones proporcionaron los datos necesarios para evaluar el comportamiento de las temperaturas en las distintas fases en construcción de la superficie asfáltica. A través de un análisis estadístico de los datos, se elaboraron gráficos de frecuencia, para determinar los porcentajes de temperatura, que se encontraban dentro de las exigencias establecidas por la norma.

A la salida de la pavimentadora se tomaron varias imágenes con la cámara termográfica, lo que permitió capturar imágenes térmicas de la mezcla asfáltica justo después de su dispersión por la pavimentadora. Posteriormente, se tomaron imágenes durante el proceso de compactación.

Resultados y análisis

Para contrastar las temperaturas obtenidas con las consideradas y recomendadas por normativas y estándares técnicos vigentes, se emplearon cálculos estadísticos realizados a través del programa Minitab. Este análisis permitió determinar los porcentajes de temperaturas que se encontraron dentro de los valores exigidos en cada momento de su cimentación.

En la visualización y análisis de los datos de temperatura capturados por la cámara termográfica, se utilizó el programa Smart View. Este software permitió revelar las imágenes termográficas, mostrando las variaciones de temperatura en la superficie del pavimento en las diferentes etapas del proceso de colocación y compactación.

El uso de isolíneas de temperaturas en las imágenes obtenidas mediante Smart View ayudó a visualizar de manera gráfica las variaciones térmicas a lo largo del tramo de obra vial, proporcionando información valiosa para la evaluación y optimización de los procedimientos de pavimentación.

Las imágenes termográficas obtenidas fueron analizadas inicialmente de manera visual y posteriormente procesadas, utilizando el programa Smart View. Este software no solo facilita la creación de informes, sino que también permite editar y analizar imágenes rápidamente, ajustando parámetros como la temperatura y el factor de emisividad. En el caso del pavimento asfáltico, se utilizó un valor de emisividad de 0.93, que es adecuado para este tipo de superficie.

El rango de calibración de la cámara termográfica utilizado fue de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual es apropiado para capturar las temperaturas que suelen presentarse en las mezclas asfálticas durante su proceso de colocación y compactación.

Además, se realizó un análisis cuantitativo mediante el programa Minitab, utilizando una tabla de dispersión para comparar las diferentes temperaturas medidas en las mezclas asfálticas en porcentajes. Este enfoque permitió, obtener una evaluación detallada de las variaciones térmicas y establecer patrones significativos que contribuyeron al estudio técnico propuesto en este artículo de investigación.

En conjunto, estas metodologías y herramientas, proporcionaron un marco robusto para investigar y documentar las condiciones térmicas del pavimento asfáltico durante su proceso de cimentación, facilitando la generación de conclusiones fundamentadas y la optimización de prácticas en la cimentación de vías terrestres.

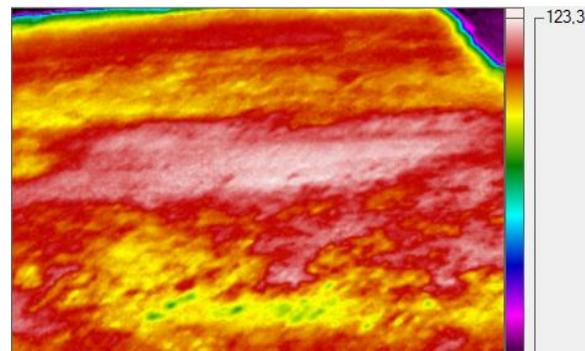
La Figura 1.- Muestra la mezcla en caliente, inmediatamente después de ser extendida por la pavimentadora. En la Figura 1(a), se presenta una imagen fotográfica del área medida, mientras que en la Figura 1(b), se muestra el espectro termográfico obtenido con el programa Smart View. Los colores más cálidos, como el rojo, anaranjado y amarillo, representan áreas más calientes, mientras que los colores más fríos, como el azul y el violeta, indican áreas más frías.

Esta visualización permite identificar con precisión, las áreas de mayor y menor temperatura, lo cual es esencial para comprender la uniformidad térmica de la mezcla. Nótese que los diferentes colores representados, indican variaciones de temperatura en la superficie, evidenciando las diferencias térmicas en la mezcla extendida. Dentro del espectro, predominan los colores rojo, blanco y amarillo, lo cual indica que no existen grandes diferencias de temperatura.

Figura 1: Resultados de la captura de imagen termográfica inmediatamente después de extendida la mezcla. Obtenidas mediante el Programa Smart View.



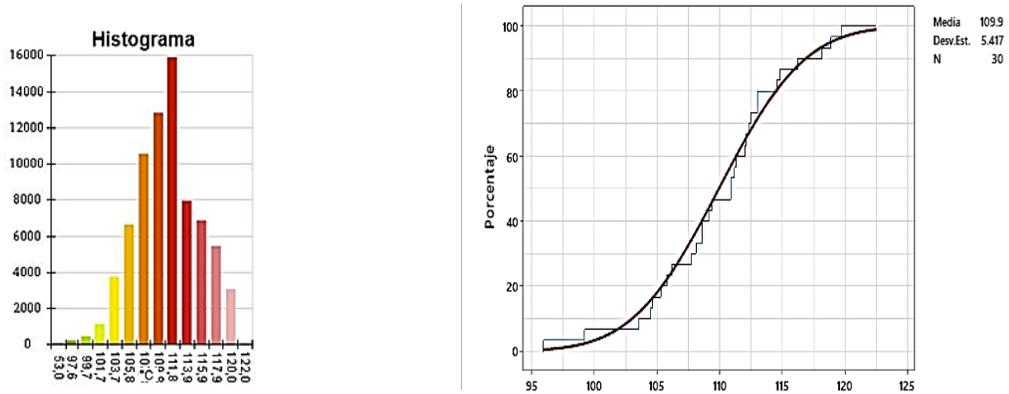
a) Visión fotográfica de la mezcla extendida inmediatamente después de extensión.



b) Espectro termográfico visible en la foto

En la Figura 2.- Se presentan los resultados estadísticos de las temperaturas capturadas en la imagen de la Figura 1. En el gráfico (a) se muestra el histograma generado por el programa. Se observa que las temperaturas capturadas por la cámara varían entre 99.7°C y 120°C. Del gráfico de frecuencias, se deduce que el 98% de las temperaturas registradas están por encima de los 100°C, pero solo el 50% es mayor a 110°C y solo el 3% supera los 120°C. Esto indica que la temperatura de la mezcla no es óptima para iniciar el proceso de compactación. Aunque la mezcla puede ser compactada, es probable que se presenten problemas en las densidades alcanzadas, todo dependerá de la eficiencia con la que se ejecute el proceso.

Figura 2: Resultados de las frecuencias de temperaturas observadas.



a) Histograma de frecuencias obtenidas por el Programa Smart View.

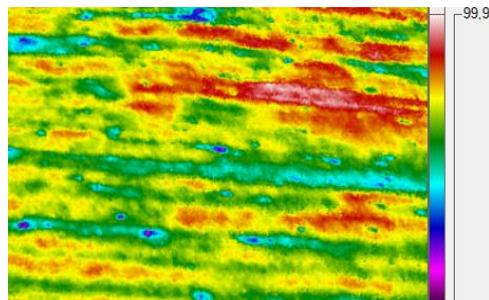
b) Gráfico de frecuencias acumuladas obtenidas mediante el Programa Minitab.

La Figura 3,- Muestra la mezcla en caliente durante el proceso de compactación. En la Figura 3(a) se presenta la imagen fotográfica del área medida, mientras que en la Figura 3(b) se muestra el espectro termográfico obtenido con el programa Smart View. Esta visualización permite analizar la distribución de las temperaturas en la superficie pavimentada, evaluando así la uniformidad y adecuación de la compactación. Se observa una mayor diversidad de colores en comparación con las imágenes tomadas durante el extendido, lo que evidencia mayores diferencias térmicas en la mezcla. El espectro muestra un rango más amplio de colores: rojo, amarillo, verde y azul, indicando variaciones significativas de temperatura, con predominio del color amarillo.

Figura 3: Resultados de la captura de imagen termográfica después del paso del rodillo de compactación. Obtenidas mediante el Programa Smart View.



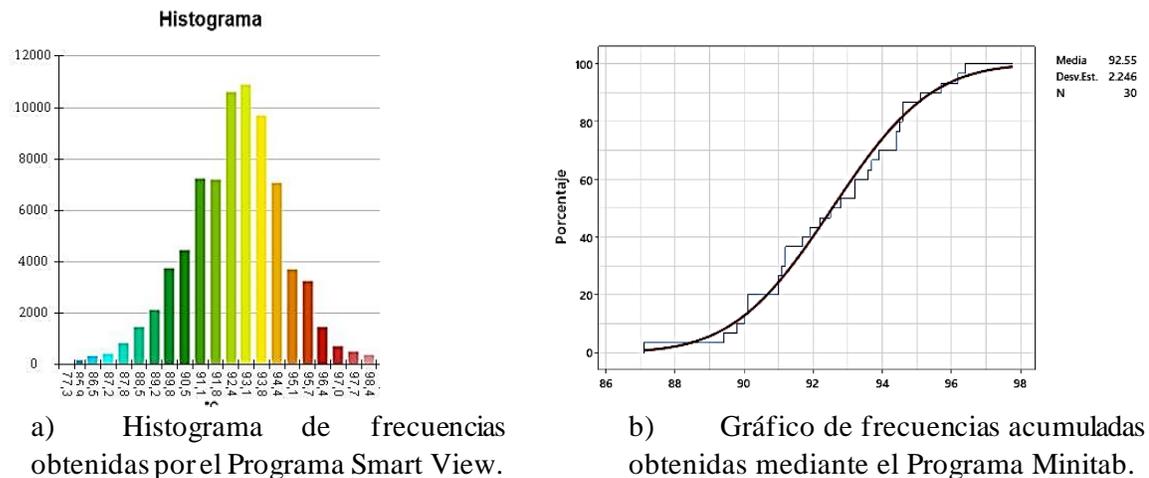
a) Visión fotográfica de la mezcla extendida inmediatamente después del paso del rodillo.



b) Espectro termográfico de la foto después del paso del rodillo tándem.

En la Figura 4.- Se presentan los resultados estadísticos de las temperaturas capturadas en la imagen de la Figura 3. En el gráfico (a) se muestra el histograma generado por el programa. Se observa en el histograma que las temperaturas capturadas por la cámara varían entre 84.6°C y 99°C. Del gráfico de frecuencias se deduce que el 100% de las temperaturas registradas están por encima de 85°C y por debajo de 100°C. El hecho de que el 100% de la mezcla este por encima de los 85°C, indica que cumple con lo exigido, ya que se exige que no se encuentre por debajo de 85 °C, para garantizar la adecuada compactación y resistencia; por consiguiente, tiene una temperatura adecuada; aunque, considerando que las capturas se realizaron al inicio del proceso, la temperatura puede ser inadecuada para recibir los siguientes pases del cilindro compactador.

Figura 4: Resultados de las frecuencias de temperaturas observadas después del paso del rodillo.



En el espectro termográfico se observa una mayor variedad de tonalidades de temperatura en la mezcla; lo que sugiere, que la reducción de temperatura no ha sido uniforme en toda la superficie pavimentada al paso del cilindro; lo que puede resultar en mayores diferencias de densidades en la mezcla. La comparación entre los histogramas de frecuencias representados en las figuras 2 (a) y 4 (a), indican que el espectro de temperaturas inicialmente en la extensión, en un rango de 20°C (entre 99.7 y 120 °C), se han reducido hasta el rango de 11°C (entre 87 y 98%).

Conclusiones

El presente artículo de investigación, exterioriza una alternativa a la evaluación de temperaturas de colocación de mezclas asfálticas en calientes, mediante termografía infrarroja, llegando a las conclusiones que siguen:

- La visualización de imágenes termográficas proporciona valiosa información sobre las variaciones de temperatura en el pavimento durante su colocación y compactación. Los resultados son inmediatos, lo que facilita la detección de temperaturas en áreas amplias en poco tiempo, otorgando mayor confiabilidad y eficacia a los resultados.
- La utilización de la cámara termográfica TiS65-18060670 se destaca por su buena precisión en la detección de diferentes temperaturas en las capas asfálticas, lo que facilita la identificación de posibles defectos en la mezcla y permite elaborar informes detallados. Es fundamental realizar una calibración precisa de la cámara termográfica y ajustar parámetros como la emisividad para garantizar la exactitud de las mediciones de temperatura.
- La importancia de controlar las temperaturas durante la pavimentación, para lograr una compactación adecuada, se comprueba a través de la interpretación de los resultados termográficos. Los análisis cuantitativos de las variaciones térmicas mediante gráficos de frecuencias, permiten evaluar y comparar las temperaturas de la mezcla con las especificaciones, identificando incumplimientos y sus posibles consecuencias en el deterioro prematuro de la mezcla. La integración de tecnologías termográficas y análisis estadísticos, han sido decisivas y concluyentes para analizar el cumplimiento de normas técnicas y precisar los porcentajes de valores observados que no cumplen con estas normativas de urgencia necesaria como responsabilidad técnica y profesional de quienes profesamos la Ingeniería Civil.

Referencias

1. Brown, E. R., & Haddock, J. E. (2019). Hot Mix Asphalt Paving Handbook 2020. National Asphalt Pavement Association (NAPA).
2. Gracieli, S. V. (2018). Aplicabilidade da termografia infravermelha em revestimentos asfálticos. Alegrete

3. Pacara-Copa, M., Rocha, J. H. A., & Ledezma-Pérez, J. S. (2020). Time variability analysis for damage detection in flexible pavement using infrared thermography. *Revista ALCONPAT*, 10(3), 350-363.
4. Rocha, J. A., & Póvoas, Y. V. (2017). Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art. *Revista Alconpat*, 7(3), 200-214.
5. Barreira, E.; Almeida, R.M.S.F.; Simões, M.L. Emissivity of Building Materials for Infrared Measurements. *Sensors* 2021, 21, 1961.
6. Read, J., & Whiteoak, D. (2021) *The Shell Bitumen Handbook*. Shell International Petroleum Company.
7. Bonett Solano, G. E. (2014). *Guía de procesos constructivos de una vía en pavimento flexible*.
8. [8] Fletcher, T. A., & Berthod, C. (2011). Application of Thermographic Inspection in Civil Engineering. *Journal of Infrastructure Systems*, 17(4), 184-191.
9. Lavin, P., & Leiva, F. (2020). *Hot Mix Asphalt: Pavement Materials and Mixture Design*. Springer.
10. Gupta, R., & Sharma, S. (2021). *Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction*. Elsevier.
11. Wild, W. (2007). Application of infrared thermography in civil engineering. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng*, 13(4), 436-444.
12. Copa, M. P. (2019). Análisis Superficial de una Fisura en Pavimento Flexible con Termografía Infrarroja. *Journal Boliviano de Ciencias*, 15(47), 25-32.