TERMOGRAFÍA INFRARROJA COMO ALTERNATIVA NO DESTRUCTIVA PARA LA EVALUACIÓN DE DETERIORO EN PAVIMENTO FLEXIBLE

M. PACARA-COPA^{1*}, J. H. A. ROCHA², S. J. L. PEREZ¹

* Autor de Contacto: marinapacara@gmail.com

¹ Departamento de Vialidad, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Tecnología, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia

RESUMEN

La falta de una base de datos y programas de inspección de forma constante a las vías en Bolivia, además del escaso control de calidad a la hora de la conformación de la capa de rodadura hacen que se manifiesten problemas en el pavimento flexible. En estos casos, el mantenimiento y rehabilitación resulta costoso por lo que en estos últimos años se ha estado buscando formas de lidiar con este aspecto. En este sentido, se propone analizar la aplicación de la termografía infrarroja como alternativa no destructiva para la inspección de deterioro en pavimentos flexibles, ya que un buen servicio vial en condiciones adecuadas refiere a una buena gestión de pavimentos. Para analizar la aplicación termográfica se realizó un monitoreo de 14 horas continuas (5 am a 7 pm) para cuatro zonas de estudio en una avenida céntrica de la Ciudad de Cochabamba - Bolivia, a partir de este monitoreo se determinó que el rango óptimo horario para la toma de imágenes termográficas es a partir de las 11 am hasta las 4 pm, también se evidenció la visualización del deterioro mediante la colorimetría diferenciada en las imágenes termográficas a diferentes horas. A pesar del gran potencial de este ensayo, hacen falta más estudios para concretarse como un método de inspección, siendo que es sensible a las condiciones ambientales.

Palabras clave: Termografía infrarroja; Pavimento flexible; Inspección.

ABSTRACT

The lack of a database and inspection programs constantly to the roads in Bolivia, in addition to poor quality control at the time of the formation of the rolling layer cause problems in the flexible pavement. In these cases, the maintenance and rehabilitation is expensive so in recent years has been looking for ways to deal with this aspect. In this sense, it is proposed to analyze the application of infrared thermography as a non-destructive alternative for the inspection of deterioration in flexible pavements, since a good road service in adequate conditions refers to good pavement management. To analyze the thermographic application, a continuous monitoring of 14 hours was conducted (5 am to 7 pm) for four study zones in a central avenue of the City of Cochabamba - Bolivia, from this monitoring it was determined that the optimal time range for Thermographic imaging is from 11 am to 4 pm, the visualization of the deterioration was also evidenced by the differentiated colorimetry in the thermographic images at different times. Despite the great potential of this trial, more studies are needed to be specified as an inspection method, being that it is sensitive to environmental conditions.

Keywords: Infrared thermography; Flexible pavement; Inspection.

RESUMO

A falta de um banco de dados e programas de inspeção constantemente para as estradas na Bolívia, além de um controle de qualidade deficiente no momento da formação da camada rolante causam problemas no pavimento flexível. Nesses casos, a manutenção e a reabilitação são caras, de modo que nos últimos anos tem procurado maneiras de lidar com esse aspecto. Nesse sentido, propõe-se analisar a aplicação da termografia infravermelha como alternativa não-destrutiva para a inspeção de deterioração em pavimentos flexíveis, uma vez que um bom serviço rodoviário em condições adequadas se refere ao bom manejo do pavimento. Para analisar a aplicação termográfica, foi realizado um monitoramento contínuo de 14 horas (5h às 19h) para quatro zonas de estudo em uma avenida central da cidade de Cochabamba - Bolívia, a partir desse monitoramento foi determinado que o intervalo de tempo ideal para a imagem termográfica é das 11h às 16h, a visualização da deterioração também foi evidenciada pela colorimetria diferenciada nas imagens termográficas em diferentes momentos. Apesar do grande potencial deste estudo, mais estudos são necessários para serem especificados como um método de inspeção, sendo que ele é sensível às condições ambientais.

Palavras-chave: Termografia infravermelha; Pavimento flexível; Inspeção

1. INTRODUCCIÓN

En Bolivia, la historia del mantenimiento y conservación de carreteras se inició con la creación del Servicio Cooperativo Boliviano Americano de Caminos (SCBAC), fundado en 1955 (Lovera, 2017). El 5 de octubre de 1961 se crea el Servicio Nacional de Caminos cuya políticas y responsabilidades fueron modificándose en el tiempo hasta que posteriormente según la Ley 3507 (Bolivia, 2006a), confiere la responsabilidad de la planificación y gestión de la Red Vial Fundamental (RVF) a la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). El Decreto Supremo 28946 (Bolivia, 2006b), establece como misión institucional de la ABC la integración nacional mediante la planificación y la gestión de la RVF, las cuales comprenden las siguientes actividades: planificación, administración, estudios y diseños, construcción, mantenimiento, conservación y operación de la RVF y sus accesos (ABC, 2011). En Bolivia, un gran porcentaje de las vías presentan problemas visibles crónicos, por lo que la atención oportuna para el mantenimiento y/o rehabilitación de éstas, sobrepasa la capacidad de las entidades encargadas de su conservación; tal es el caso de la avenida San Martín, en pleno centro de la ciudad de Cochabamba, la cual soporta un alto tráfico vehicular y diariamente se encuentra congestionada, además de presentar un pavimento flexible deteriorado (Los Tiempos, 2016).

Debido a la importancia de la vía, ésta no puede ser interrumpida para realizar las inspecciones convencionales correspondientes para una buena evaluación y diagnóstico del estado actual del pavimento flexible, de tal manera que las acciones tomadas para su rehabilitación son, en muchos casos, erróneas o de improvisación.

Por tal motivo, se hace necesario emplear técnicas que permiten una inspección que no interrumpa el tráfico y que sea eficiente a distancia. En este sentido, surge la termografía infrarroja como una alternativa para este propósito debido a que no precisa contacto directo con el objeto inspeccionado y puede ser realizada a diferentes distancias (Rocha et al., 2017). Sin embargo, es necesario evaluar sus capacidades y limitaciones como método de inspección para pavimentos flexibles, específicamente.

A pesar de que la termografía infrarroja tiene ya muchos años como alternativa de evaluación en distintas ramas como la ingeniería eléctrica, mecánica (Muñoz-Potosi et al., 2009; Revillas, 2011; Baggathiappan et al., 2013) e ingeniería civil (Rehman et al., 2016; Rocha and Póvoas, 2017), la poca difusión y aplicación en Bolivia, hace que los avances en este campo sean menores. En este sentido, el presente trabajo tiene por objetivo estudiar el potencial de la técnica de termografía infrarroja para evaluar el estado de deterioro actual del pavimento flexible, considerando como caso de estudio dos

tramos de la avenida San Martín – Cochabamba, incentivando, de esta forma, el desarrollo de estudios posteriores.

2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La radiación térmica es el tipo de radiación electromagnética que compete a la transferencia de calor y que es emitida como consecuencia de las transiciones de energía de moléculas, átomos y electrones. La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo dependerá de la temperatura a la cual se encuentra la superficie, de esta manera, se considera que todo cuerpo cuya temperatura se encuentre por encima del cero absoluto emite radiación infrarroja (Rocha et al., 2017).

La energía térmica irradiada por un objeto se expresará en función de la energía emitida por un radiador perfecto llamado cuerpo negro o ideal (Cengel, 2003).

Aunque el ojo humano puede ver la radiación en el espectro electromagnético entre $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$, el área infrarroja va de $0.9 - 14 \mu\text{m}$. Las cámaras termográficas destinadas para inspección trabajan en el área $8 - 14 \mu\text{m}$. La relación entre la radiación electromagnética y la temperatura se explica en la ley de Stephan – Boltzmann, ecuación (1) (Rocha et al., 2017).

$$W = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Donde, W es la Intensidad de la radiación (W/m^2), σ es la Constante de Stephan – Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) y T es la temperatura medida (K).

3. PROCEDIMIENTO

Para lograr el objetivo del presente artículo se realizó un monitoreo de 14 horas durante un día, específicamente el 22 de julio de 2018, mediante la toma de imágenes termográficas a cada hora, tomando como eje horario las 12 del medio día; es decir que a partir del medio se consideró 7 horas antes y 7 horas después, con lo que el rango horario de monitoreo fue de 5 am a 7 pm.

Se seleccionaron dos tramos de estudio: el primero ubicado en la avenida San Martín entre calle Jordán y Sucre, sobre la cual se encuentran frente a frente el Palacio de Justicia y el mercado 25 de Mayo; y el segundo en la avenida San Martín entre avenida Heroínas y calle Colombia, en cuya recta se observan centros comerciales y ópticas.

Cada tramo estudiado se dividió en dos zonas para la toma de termogramas. En la Figura 1 se muestran las zonas donde fueron tomadas las imágenes termográficas, la zona 1 se ubica en la avenida San Martín esquina Jordán acera Sudeste, de donde se obtiene imágenes panorámicas de toda la cuadra; la zona 2 se ubica a mitad de cuadra sobre la avenida San Martín entre calle Jordán y Sucre acera Este; la zona 3 se ubica en la intersección de la avenida San Martín y Heroínas sobre la jardinera central, y la zona 4 se ubica a mitad de cuadra sobre la avenida San Martín entre avenida Heroínas y calle Colombia.

Figura 1. Zonas para la toma de imágenes termográficas.

El equipo utilizado fue un CAT S60 que viene equipado con una cámara FLIR integrada cuyas características se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones MyFLIR de S60.

Cámara térmica y visual con MSX	
Sensor Térmico	Tamaño de pixel de 17 mm, rango espectral de 8 a 14 mm.
Resolución térmica	80 x 60
Resolución visual	640 x 480
HFOV/VFOV	46° ± 1°/35°±1°
Frecuencia de imagen	8,7 Hz
Enfoque	Fijo 15 cm - Infinito
Integrado en Obturador	Automático/manual
Radiometría	
Rango dinámico de escena	-20°C - 120°C
Precisión	±5°C o ±5%
	Porcentaje de la diferencia entre la temperatura ambiente y la escena.
	60 s aplicables después del inicio cuando la unidad se encuentra entre 15°C y 35°C y la escena se encuentra entre 10°C y 120°C.
Sensibilidad Térmica (MRDT)	150 mK

Fuente: FLIR (2016)

Los termogramas resultantes del monitoreo (con un intervalo de 1 hora) fueron procesados y analizados mediante el programa FLIRTools.

FLIRTools además de ser una herramienta que facilita la creación de informes de inspección, permite editar y analizar imágenes con rapidez ya que el programa permite el ajuste y modificación de los parámetros, escalar el rango de temperaturas y/o cambiar la colorimetría según el escenario que convenga al estudio.

4. RESULTADOS

Las imágenes termográficas de las cuatro zonas fueron analizadas de manera visual en primera instancia, luego de manera cuantitativa para determinar el rango óptimo para la toma de imágenes, y paralelamente se analizaron las cualidades del programa FLIRTools en beneficio de la técnica que se propone.

4.1 Visibilidad de los deterioros de la capa de rodadura en las imágenes termográficas

Después del monitoreo en campo, se procedió a verificar la visibilidad del deterioro en las imágenes termográficas. La Figura 2 muestra la Zona 4 y la Figura 3 el termograma.

Figura 2. Imagen digital de la Zona 4.

Figura 3. Imagen térmica de la Zona 4.

En la Figura 2 se distinguen fisuras transversales (B) y longitudinales (A), piel de cocodrilo (C), desprendimiento de agregados (D), entre otros defectos. En la Figura 3 se muestra la imagen termográfica de la zona anteriormente mencionada, donde se puede apreciar la colorimetría variada que pone en evidencia de manera preliminar una relación con las fallas observadas en la Figura 2.

Nótese que la imagen termográfica de la Figura 3 muestra en la parte lateral derecha el rango de temperaturas en la cual se está visualizando, ésta varía de 26°C a 34.9°C mostrando de color amarillo con tendencia a blanco las temperaturas altas y de color azul con tendencia a negro las temperaturas bajas. La trama de colores puede ser modificada a requerimiento del observador. Se observa que no existe uniformidad en el asfalto, pues se distinguen áreas frías y calientes.

4.2 Variación de las imágenes termográficas a diferentes horas

Se analizó de manera visual la colorimetría diferenciada de la Zona 1 a diferentes horas del día bajo un mismo rango de temperaturas con la ayuda del programa FLIRTools. En la Figura 4 se puede apreciar las imágenes termográficas de la Zona 1 en tres horarios diferentes y enfocados en un mismo rango de

temperaturas. El rango de temperaturas fue 23°C como máximo y 16°C como mínimo, donde las Figuras 4a, 4b, 4c corresponden a las horas de 7 am, 1 pm y 6 pm, respectivamente.

Figura 4. Visibilidad de las imágenes termográficas a diferentes horas del día de la Zona 1.

Al observar las imágenes termográficas en relación a las imágenes digitales se puede notar que, en la Figura 4b, correspondiente a la 1 pm, el asfalto flexible presenta diferentes temperaturas sobre su superficie, no sucede lo mismo con la Figura 4a correspondiente a las 7 am que no muestra ninguna diferencia de temperaturas en el pavimento, la Figura 4c correspondiente a las 6 pm solo algunos sectores del pavimento muestran colores que representan temperaturas cercanas al máximo, teniendo en cuenta el rango de temperaturas.

4.3 Determinación del rango horario óptimo durante el día para la toma de imágenes termográficas

Para determinar el rango óptimo horario para la toma de imágenes termográficas fue utilizada la diferencia de temperaturas de dos sectores de diferentes características, a modo de obtener un diferencial para que pueda ser evaluado mediante una gráfica.

La ecuación (2) es utilizada para obtener la diferencia de temperatura.

$$\Delta T = T_c - T_f \quad (2)$$

Donde, ΔT es el diferencial o gradiente térmico ($^{\circ}\text{C}$), T_c es la temperatura del área deteriorada en estudio ($^{\circ}\text{C}$) y T_f es la temperatura de un área diferente a la deteriorada ($^{\circ}\text{C}$)

Las Figuras 5, 6, 7 y 8, muestran las temperaturas en horas del día de dos puntos con características diferentes analizados en las 4 zonas, esto para que se pueda apreciar el diferencial térmico o gradiente de temperatura (ΔT).

Figura 5. Temperaturas de la Zona 1.

Figura 6. Temperaturas de la Zona 2.

Figura 7. Temperaturas de la Zona 3.

Figura 8. Temperaturas de la Zona 4.

La Figura 9 muestra el diferencial de temperaturas (ΔT) de las cuatro zonas en función del tiempo, donde se observa que los picos de las gradientes de valores máximos se dan entre las 11 y 16 horas; también se observa que de 5 a 8 horas los valores diferenciales son mínimos, siendo este periodo no apto para un análisis adecuado. El periodo de 16 a 19 horas muestra valores diferenciales pequeños debido a que algunos sectores por sus características siguen manteniendo el calor, este punto se puede apreciar mejor en la Figura 4c. Se puede concluir que el mejor periodo es durante 11 a 16 horas porque existe mayor diferencial en la temperatura mostrando defectos en los termogramas, lo que concuerda con otras investigaciones que indican que cuanto los gradientes térmicos sean más elevados los defectos son detectados (Rocha et al., 2017).

Figura 9. Gradiente de temperatura de las 4 zonas en estudio.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, la aplicación de la termografía infrarroja en la evaluación del deterioro de pavimentos flexibles arroja resultados positivos. El ensayo puede ser considerado como método de inspección no destructivo, ya que es capaz de analizar grandes áreas en pequeños intervalos de tiempo; sin embargo, estos periodos son limitados a las horas de la tarde, horas de la mañana y la noche que pueden no ser efectivos para realizar inspecciones, siendo que el rango óptimo está entre las 11:00 am y 16:00 pm.

Además de ser un método no destructivo es de no contacto y puede detectar anomalías no visibles como por ejemplo la retención de humedad en el pavimento flexible.

Otra ventaja de este método es lo económico que resulta por no requerir de grandes equipos, herramientas sofisticadas ni gran cantidad de personas para aplicar este método.

El método muestra gradientes térmicos bajos en días nublados a diferencia de días soleados con temperaturas altas. Los cambios bruscos de temperatura ambiente durante el monitoreo arrojan datos discontinuos que son perjudiciales para el análisis del comportamiento del deterioro en pavimento flexible, sobretodo tratándose de investigaciones preliminares.

6. REFERENCIAS

- ABC – Administradora Boliviana de Carreteras (2011), “*Manual de diseño de conservación vial*”. ABC, La Paz, Bolivia, p. 365. Último acceso 30 de mayo de 2019. Disponible en: http://www.abc.gob.bo/wp-content/uploads/2018/09/manual_de_diseño_de_conservación_vial_abc.pdf
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B., Saravanan, T., Philip, J. (2013), *Infrared thermography for condition monitoring - A review*. Infrared Physics & Technology. 60(1):35-55. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Bolivia (2006a), *Ley N°3507*, 27 de octubre de 2006. Último acceso 30 de mayo de 2019. Disponible en: http://www.abc.gob.bo/wp-content/uploads/2018/07/Ley_3507.pdf

- Bolivia (2006b), *Decreto Supremo N°28946*, 25 de noviembre de 2006. Último acceso 30 de mayo de 2019. Disponible en: http://www.abc.gob.bo/wp-content/uploads/2018/07/Decreto_Supremo_N%C2%BA_28946.pdf
- Cengel, Y. (2003), *Heat Transfer, a practical approach*. McGraw-Hill, Segunda Edición, p. 932.
- FLIR (2016). *Smartphone S60 de Cat® Manual del usuario*. Último acceso: 28 de mayo de 2019. Disponible en: <https://www.catphones.com/download/User-Manuals/S60-Smartphone/S60-Manual-del-usario-Espa%C3%B1ol.pdf>
- Los Tiempos (2016), *Caos de tráfico vehicular en la ciudad de Cochabamba*. Último acceso 30 de mayo de 2019. Disponible en: <http://www.lostiempos.com/actualidad/opinion/20161221/columna/caos-trafico-vehicular-ciudad-cochabamba>
- Lovera, G. C. (2017), *“La política caminera del modelo de capitalismo de Estado de 1952 – 1985”*, Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, p. 126.
- Muñoz-Potosí, A., Pencue-Fierro, L., León-Téllez, J. (2009), *Análisis Termográfico Para La Determinación De Puntos Críticos En Equipos Mecánicos Y Eléctricos*. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 7(1):1-4. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90312171013>
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S. A., Jameel, M. (2016), *Nondestructive test methods for concrete bridges: A review*. Construction and Building Materials. 107(15):58-86. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Revillas, S. (2011), *“Guía de la termografía infrarroja, aplicaciones en ahorro y eficiencia energética”*. eBuilding, Madrid, España, p. 189. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-fenercom-2011.pdf>
- Rocha, J., Póvoas, Y. (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. Doi: <https://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- Rocha, J., Póvoas, Y., Silva, M., Monteiro, E. (2017), *Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha*. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, 2(3): 58-65. Doi: <https://doi.org/10.25286/rep.v2i3.688>