

Detección de delaminaciones en puentes de concreto armado usando Termografía Infrarroja

Detection of Delaminations in Reinforced Concrete Bridges Using Infrared Thermography

J. H. A. Rocha ^{1*}, Y. Póvoas ^{**}

* Universidad Privada del Valle, Tiquipaya, BOLIVIA

** Universidad de Pernambuco, Recife, BRASIL

Fecha de Recepción: 04/07/2018

Fecha de Aceptación: 18/12/2018

PAG 55-64

Abstract

The objective of this study is to evaluate the capability of infrared thermography for delamination detection in different types of concrete. This methodology was experimental, so two test concrete specimens with water/cement ratios (w/c) of 0.50 and 0.60 were prepared, and delaminations were simulated by inserting polystyrene plates (100 x 100 mm) with different thickness at different depths (25, 50 and 75 mm). The results show that the specimens with lower w/c ratio could detect defects more easily than the specimens with higher w/c ratio. The maximum depth of delamination detected was 50 mm with a minimum thickness of 3 mm. The results also show that morning hours are the best time for detection. However, night-time as an alternative period is presented. This technique is effective for superficial delamination detection, essentially for those elements exposed to sunlight during the day and high relative humidity in the night periods.

Keywords: Non-destructive evaluation, infrared thermography, bridge inspection, concrete, delamination

Resumen

El objetivo de este estudio es evaluar la capacidad de la termografía infrarroja para detectar la delaminación en diferentes tipos de concreto. Esta metodología es experimental por lo que se prepararon dos probetas de ensayo de hormigón, con razón agua/cemento de 0,50 y 0,60. Las delaminaciones se simularon insertando placas de poliestireno (100 x 100 mm) de diferente espesor a diversas profundidades (25, 50 y 75 mm). Los resultados señalan que la probeta de ensayo con menor razón a/c podría detectar los defectos más fácilmente que la con mayor razón a/c. La profundidad máxima de delaminación detectada fue de 50 mm con un espesor mínimo de 3 mm. Los resultados también señalan que las horas de la mañana son las mejores para realizar la detección; sin embargo, se presentan las horas nocturnas como periodo alternativo. Esta técnica es efectiva para la detección de la delaminación superficial, especialmente para aquellos elementos expuestos a la radiación solar durante el día y a una humedad relativa alta en los periodos nocturnos.

Palabras clave: Evaluación no destructiva, termografía infrarroja, inspección de puentes, concreto, delaminación

1. Introducción

Los puentes son estructuras muy importantes por la función que desempeñan, sin embargo, el mantenimiento e inspección de estas estructuras ocurre entre periodos muy prolongados, lo que puede acarrear problemas al no realizar periódicamente la detección de los defectos, dejando a la estructura vulnerable a un rápido deterioro. Los elementos de las superestructuras como los tableros pueden deteriorarse debido a la exposición directa a la agresividad medio ambiental y de las cargas de tráfico que, en muchos casos, podría ser mayor a la proyectada (Vemuri y Atadero, 2017; Hiasa et al., 2017).

El deterioro de un puente puede ocurrir por diversos mecanismos, principalmente debido a la corrosión del acero, que termina en la acumulación de óxido de hierro, generando así la expansión del acero y un esfuerzo de tracción radial en el hormigón que provoca su agrietamiento, delaminación y descantillado (Oh et al., 2013; Washer, 2012).

En la mayoría de los casos, la inspección del puente se realiza visualmente o usando métodos destructivos. Sin embargo, esos métodos presentan varias limitaciones e incertezas en la evaluación del puente (Oh et al., 2013; Rehman et al., 2016). Para reducir estos aspectos, se usan diversos ensayos no destructivos como el método Impact-Echo (IE), Termografía Infrarroja (TIR), el Radar de Penetración Terrestre o Georadar (GPR), la Velocidad de pulso ultrasónico (VPU), entre otros (Rehman et al., 2016). La aplicabilidad de estos métodos ha sido evaluada tanto en el laboratorio como en obra (Yehia et al., 2017). No obstante, muchas técnicas no cuentan con normas específicas para la inspección y requieren el contacto directo con la estructura, además de un complejo análisis de los datos (Oh et al., 2013; Watase et al., 2015).

La termografía infrarroja tiene muchas ventajas sobre otros métodos no destructivos, ya que puede ser usada de forma remota evitando el contacto directo; puede analizar áreas y entregar una mejor visión general de las condiciones de la estructura; los resultados son inmediatos, entre otros. En el caso de la inspección de puentes de hormigón armado, su uso específico se relaciona con la detección de la delaminación como producto de la corrosión del hormigón armado (Hiasa et al., 2017; AASHTO, 2011; Aggelis et al., 2010); sin embargo, no entrega información sobre la

¹ Autor de Correspondencia:

Universidad Privada del Valle, Tiquipaya, BOLIVIA
E-mail: jaquinor@univalle.edu



profundidad de los defectos y está muy influenciada por las condiciones medio ambientales (Yehia et al., 2007; Washer et al., 2010).

La calidad del hormigón también puede ser un factor de influencia en la inspección con termografía infrarroja porque, de acuerdo a los requisitos de diseño y condiciones de carga específica, los puentes se construyen con piezas de diferentes materiales y, en algunos casos, usando diversos aditivos químicos (Farrag et al., 2016). En este sentido, el objetivo de este estudio es evaluar la técnica de la termografía infrarroja para la detección de los efectos de la corrosión, específicamente las delaminaciones, considerando hormigones de diferentes razones agua/cemento (a/c) y condiciones ambientales específicas del sitio en estudio.

2. Revisión de la literatura

La termografía infrarroja es un ensayo no destructivo que mide la radiación infrarroja emitida por la superficie de un objeto, convirtiéndola en una señal eléctrica que debe ser procesada y creando imágenes térmicas llamadas termogramas. Cada material emite radiación infrarroja cuando su temperatura supera el cero absoluto (0 K) (Bagavathiappan et al., 2013).

Existen dos formas de aplicar la termografía infrarroja dependiendo de la fuente de calor: activa o pasiva. La primera requiere de fuentes de calor externas para crear gradientes térmicos en el concreto. En la segunda forma, se crea un estímulo según las condiciones ambientales, sin fuentes externas. Cada forma tiene aplicaciones específicas; sin embargo, la mayoría de las veces la inspección de puentes se lleva a cabo en forma pasiva (Oh et al., 2013; Bagavathiappan et al., 2013; Rocha & Póvas, 2017). En este sentido, la norma D4788-03 (ASTM 2013), establece un método de aplicación pasiva y recomienda un mínimo de 3 horas de luz solar directa para los fines de inspección.

El concepto de la aplicación de la termografía se basa en el hecho de que las delaminaciones y los defectos dentro del concreto interrumpen su flujo calórico. Durante el día, cuando el hormigón está expuesto al sol y a las condiciones ambientales, las áreas sobre las delaminaciones y los vacíos se calientan más rápidamente que las áreas de concreto sin defectos ya que éste no permite la transferencia de calor puesto que las delaminaciones y los vacíos generalmente se rellenan con aire o agua que tienen una capacidad térmica

diferente al concreto. Estos defectos tienen altas temperaturas en esas zonas durante el día y como sus temperaturas bajan por la noche en relación al concreto sin defectos internos, se forman diferenciales térmicos (Washer, 2012; Vaghefi, 2012; ASTM, 2013).

Según la literatura, los límites de detección de las delaminaciones en la razón a/c y profundidad no están claramente establecidos. Yehia et al. (2007) encontraron vacíos y delaminaciones a 40 mm de profundidad en el concreto con resistencia a la compresión de 28 MPa, mientras que Kee et al. (2012) encontraron delaminaciones a 50 mm en el concreto con la misma resistencia. Maierhofer et al. (2007) encontraron vacíos a 60 mm de profundidad en hormigón de 48 MPa usando termografía activa. Washer et al. (2010) pudieron detectar claramente defectos a 75 mm de profundidad en concreto de 27,6 MPa. Alfredo-Cruz et al. (2015) encontraron delaminaciones a 50 mm de profundidad en hormigones de 38 MPa con una razón a/c de 0,35; sin embargo, los defectos encontrados a 75 mm de profundidad no eran muy visibles. Farrag et al. (2016) encontraron delaminaciones y vacíos a 100 mm de profundidad usando un concreto con 50 MPa de resistencia a la compresión. La incerteza respecto de la capacidad de detección de la termografía infrarroja podría deberse al hecho de que los estudios se realizaron en diversos lugares sin condiciones especiales (Hiasa et al., 2016), además de las diversas características de los concretos usados.

3. Materiales y programa experimental

Este programa experimental se basa en la preparación de probetas preparadas para simular las superficies de los elementos de un puente que se encuentran expuestas al sol y, por lo tanto, evaluar la capacidad técnica para detectar las delaminaciones a diferentes profundidades y en diferentes tipos de hormigón. Para ello, se moldearon dos probetas con diferentes razones a/c, 0,6 (CS1) y 0,5 (CS2), con una dosificación cemento: grava : arena de 1 : 2,8 : 2,6. Se usó cemento CIII Z-32 y grava con un diámetro máximo de 19 mm.

Las dimensiones de las probetas eran de 500 × 500 × 100 mm. A fin de simular las delaminaciones en el hormigón, se colocaron placas de poliestireno de 100 × 100 mm de diferentes espesores, a diferentes profundidades y ubicaciones como lo señala la Tabla 1 y la Figura 1.

Tabla 1. Detalle de las delaminaciones artificiales

Delaminación	Probeta de hormigón 1		Probeta de hormigón 2	
	Profundidad (mm)	Espesor (mm)	Profundidad (mm)	Espesor (mm)
D1	25	3	25	3
D2	25	6	25	6
D3	25	12	25	12
D4	50	3	50	3
D5	50	6	50	6
D6	50	12	50	12
D7	50	3	75	3
D8	50	6	75	6
D9	50	12	75	12

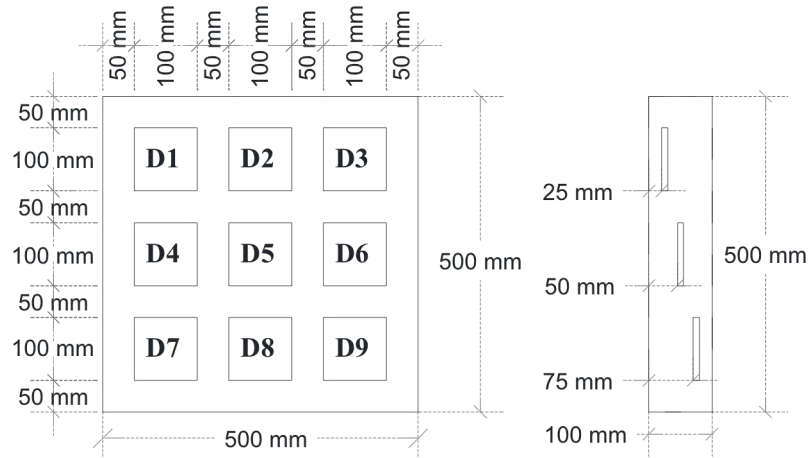


Figura 1. Posición de las delaminaciones en las probetas de hormigón

Para este estudio, se usó una cámara termográfica FLIR E60 cuyas características se describen en FLIR (2013).

Luego de 28 días de curado, las probetas de concreto se llevaron al exterior, a una zona que recibía la radiación solar durante el día, sin sombras que interfirieran. La cámara termográfica se colocó a un metro de las probetas de ensayo. Los termogramas se registraron cada 30 minutos desde las 7:00 a las 21:00 hr para observar la temperatura superficial del hormigón durante el día. Aunque algunos investigadores entregan recomendaciones sobre el horario y condiciones de exposición solar para la recopilación de los datos (Kee et al., 2012; Washer et al., 2010), no existe un periodo definido, puesto que existen contradicciones al respecto. Entonces, se decidió

registrar las mediciones el mayor tiempo posible para obtener el mejor tiempo de inspección en el sitio escogido para el estudio, la ciudad de Recife, en Brasil.

El monitoreo se realizó durante 18 días del mes de mayo de 2017, sin lluvias ni nubosidad. La temperatura ambiente y la humedad relativa se registraron con un termohigrómetro.

Además, se moldearon probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto para cada razón a/c a fin de determinar la resistencia a la compresión del concreto, usando el procedimiento establecido por la norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Los resultados de estos ensayos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resistencia a la compresión de las probetas de concreto

Propiedad	CS1	CS2
Razón a/c	0,6	0,5
Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	25,3	32,1
Densidad promedio (kg/m ³)	2198	2394

Para el análisis de los resultados, se usó una gradiente térmica o temperatura diferencial, ΔT , definida por la ecuación (1).

$$\Delta T = TD - TC \quad (1)$$

Donde TD = temperatura de la delaminación y TC = temperatura del concreto intacto.

4. Resultados y discusión

Durante el transcurso del ensayo, se pudo verificar la reproducibilidad de los datos ya que mostraban el mismo comportamiento durante todo el día, por lo que se presentan los resultados que generalizan este comportamiento. Las Figuras 2 a 7 muestran los termogramas tomados a diferentes horas del día. Los colores oscuros representan las temperaturas bajas y los colores claros representan las temperaturas altas.

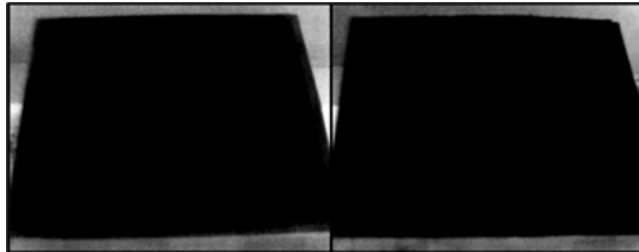


Figura 2. Termogramas a las 7 hr.: a) CS1 y b) CS2.

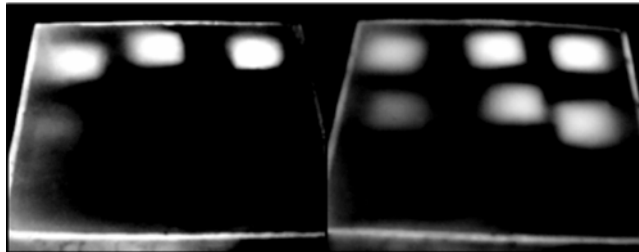


Figura 3. Termogramas a las 10 hr.: a) CS1 y b) CS2.

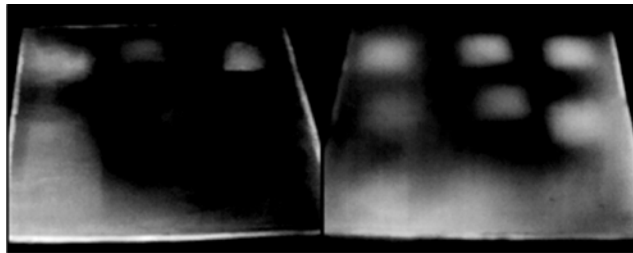


Figura 4. Termogramas a las 12 hr.: a) CS1 y b) CS2.

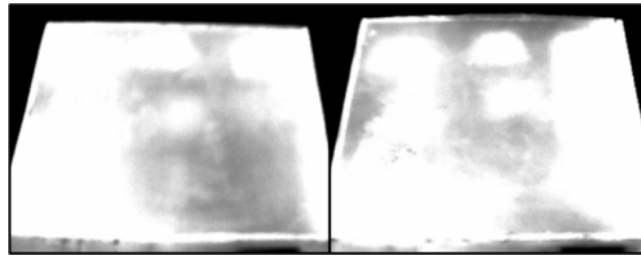


Figura 5. Termogramas a las 14 hr.: a) CS1 y b) CS2.

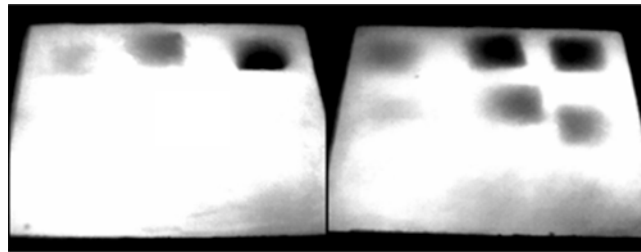


Figura 6. Termogramas a las 18 hr.: a) CS1 y b) CS2.

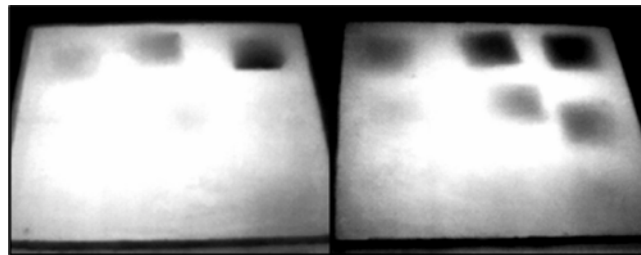


Figura 7. Termogramas a las 21 hr.: a) CS1 y b) CS2.

Se puede observar que en CS1 se detectan delaminaciones solo hasta los 25 mm de profundidad y en CS2, hasta los 50 mm de profundidad. Por la mañana, las delaminaciones son detectadas como zonas calientes en oposición a las horas de la tarde y de la noche, donde éstas se perciben como zonas frías, en comparación con el concreto intacto. Las delaminaciones más superficiales, a 25 mm de profundidad, se detectan gran parte del día, debido a su rápida absorción de calor, puesto que la capa de concreto es delgada. El calor se concentra en un área pequeña que permite un calentamiento y enfriamiento rápido.

4.1 Temperatura de la delaminación

La Figura 8 muestra el comportamiento de las delaminaciones a 25 mm de profundidad y la superficie de concreto sin ninguna delaminación en CS1. Se observa que la temperatura de las delaminaciones aumenta rápidamente durante las horas de la mañana. Sin embargo, este comportamiento se invierte en la tarde y la noche, cuando las temperaturas bajan. La Figura 9 muestra el comportamiento de la temperatura de las delaminaciones a 25 mm y 50 mm de profundidad en CS2, observándose el mismo comportamiento que en CS1. Las delaminaciones presentan temperaturas más altas en la mañana y a mediodía, pero se enfrían por la noche.

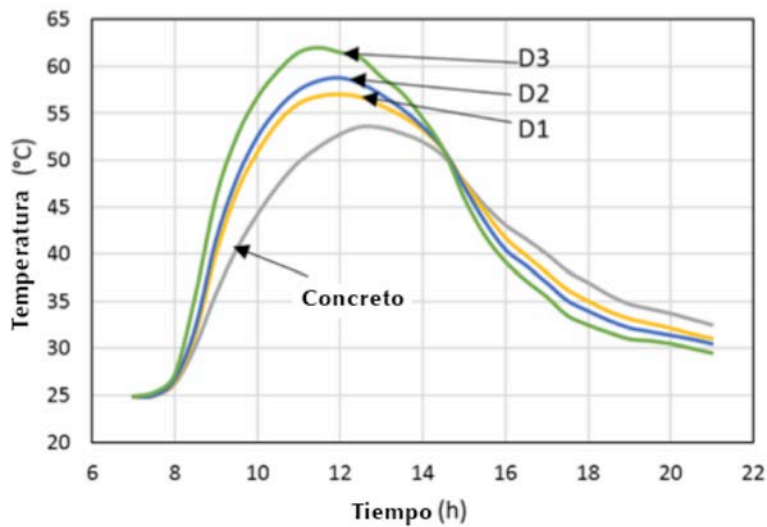


Figura 8. Comportamiento de las delaminaciones y temperaturas del concreto intacto – CS1

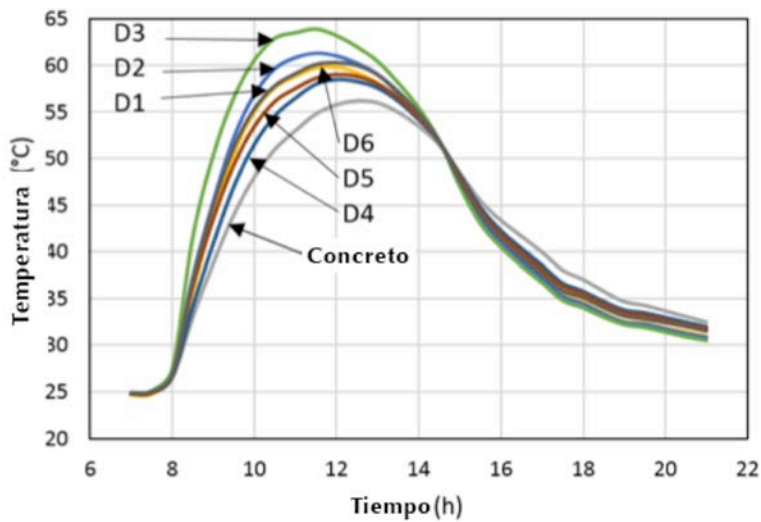


Figura 9. Comportamiento de las delaminaciones y temperaturas del concreto intacto – CS2

Las Figuras 8 y 9 muestran dos periodos: calentamiento y enfriamiento. La primera, a partir de las 7 hr y la segunda, comenzando a mediodía, con un cambio en el contraste térmico a aproximadamente las 14:30 hr.

En ambas probetas de ensayo, los valores de las temperaturas máximas para las delaminaciones y el concreto intacto se presentan alrededor de las 10 hr y a mediodía. Durante este tiempo, la temperatura del concreto intacto es inferior a la temperatura de las delaminaciones, creando contrastes térmicos positivos. A partir de las 16 hr, el concreto intacto se calienta más que las delaminaciones, creando contrastes térmicos negativos.

Según las Figuras 8 y 9, el espesor de las delaminaciones afecta a las temperaturas descritas, porque a mayor espesor de la delaminación, ésta es más caliente en relación con otras a la misma profundidad, como D3 a 25mm de profundidad en CS1, y D3 y D6 a 25 y 50 mm de profundidad, respectivamente en CS2. Esto se debe a que la delaminación permite una transferencia de calor limitada, un mayor espesor representa una mayor dificultad respecto de la transferencia de calor al concreto debajo de la delaminación, reteniendo una mayor cantidad de calor para las zonas superiores, capturadas por la cámara como zonas calientes.

En la noche, cuando el comportamiento se invierte, el concreto se enfría en estas zonas y, cuando la energía solar no está presente, las zonas tienden a equilibrarse con la temperatura ambiente. Las delaminaciones más superficiales se equilibran más rápidamente que las más profundas porque tienen capas de concreto más delgadas.

4.2 Humedad relativa y temperatura ambiente

Las Figuras 10 y 11 muestran el contraste térmico entre las zonas sobre las delaminaciones y la temperatura del concreto intacto, respecto de las condiciones ambientales registradas: temperatura ambiente y humedad relativa.

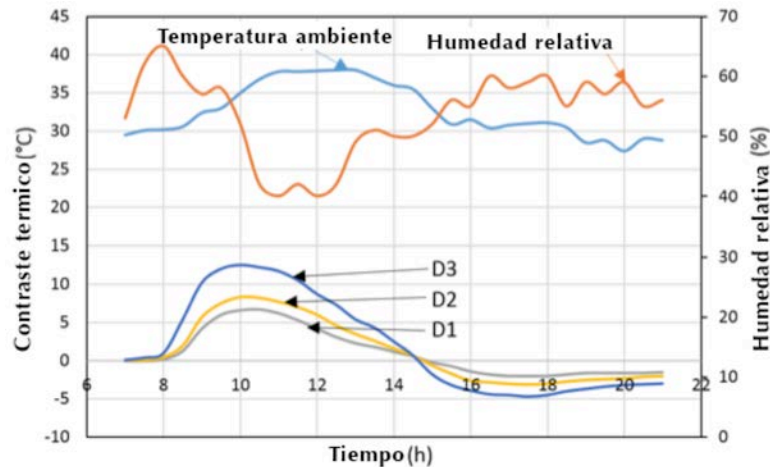


Figura 10. Contraste térmico de CS1

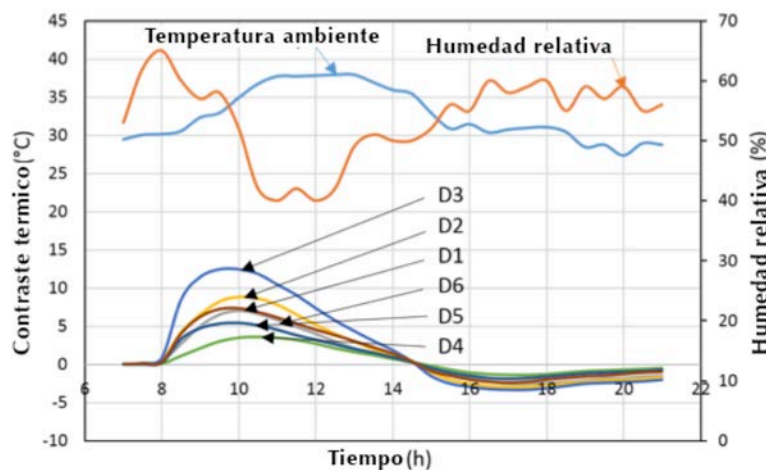


Figura 11. Contraste térmico de CS2

En ambas probetas de ensayo, se observan los mayores contrastes producidos a la misma hora a medida que la temperatura ambiente sube y que la humedad relativa baja. Los valores máximos de contraste ocurren cuando la temperatura ambiente es alta y la humedad relativa es baja. Este periodo se presenta entre las 9 hr y 13 hr, un periodo de inspección adecuado, ya que las delaminaciones se perciben como contrastes térmicos positivos, como se aprecia en las Figuras 3 y 4. Sin embargo, en el periodo previo, las delaminaciones no se detectan (Figura 2). En la tarde, a medida que la temperatura ambiente disminuye, la humedad

relativa aumenta; el contraste térmico se invierte entre las 14 y 15 hr y las delaminaciones no se detectan claramente en los termogramas (Figura 5). Después de las 15 hr, la detección se realiza por contraste térmico negativo (Figuras 6 y 7), cuando la temperatura ambiente es baja y la humedad relativa es alta. No obstante, estos valores son bajos en comparación con los de la mañana.

Este comportamiento se puede explicar considerando que las probetas de concreto están expuestas a la luz solar y al medio ambiente durante el día, lo que provoca un proceso de calentamiento por radiación y convección,



respectivamente. Sin embargo, la radiación solar tiene una mayor influencia en este proceso, aumentando rápidamente la temperatura del concreto. La presencia de defectos o delaminaciones en el concreto evita el calentamiento en las zonas bajo ellas. Por lo tanto, los defectos más superficiales se calientan más rápido que los más profundos.

Por la noche, cuando la energía solar no está presente, la transferencia de calor se produce principalmente por el mecanismo de convección entre el concreto calentado durante el día y la temperatura ambiente que presenta valores más bajos. El concreto pierde calor hasta que equilibra su temperatura con la temperatura ambiente. Las delaminaciones más superficiales tienden a equilibrarse más rápidamente que las más profundas porque tienen capas de concreto más delgadas.

La humedad relativa juega un papel importante durante el proceso de enfriamiento. Washer et al. (2010) señalan que el aire húmedo crea una transferencia de calor por convección, más eficiente entre el concreto y la temperatura ambiente, porque el aire húmedo penetra más rápidamente en el concreto que el aire seco. En este caso, los contrastes térmicos se desarrollan en el periodo nocturno con valores más altos de la humedad relativa, ayudando así en el proceso del equilibrio térmico.

4.3 Razón agua/cemento

Los termogramas (Figuras 2-7) muestran que en CS1 solo se distinguen las delaminaciones a los 25 mm de

profundidad y en CS2, hasta los 50 mm de profundidad. Esto representa una detección del 33% en CS1 (3/9) y del 67% en el CS2 (6/9).

Esta diferencia en la detección de la delaminación se atribuye principalmente a la razón a/c, puesto que es la única característica diferente en el molde de la probeta de ensayo (CS2 con una razón a/c de 0,5 y CS1 con razón a/c de 0,6). Las propiedades como la porosidad y la densidad afectan la conductividad térmica del concreto y los resultados de la termografía infrarroja (Farrag et al., 2016; Al-Hadharmi et al., 2012). En este caso, CS1 tiene menor densidad que CS2, por lo que presenta mayor porosidad y heterogeneidad, que limita el flujo de calor a través del concreto y reduce la formación del contraste térmico sobre su superficie, siendo detectable solo hasta los 25 mm de profundidad.

Según estos resultados, el rango de mayor detección de la profundidad de la delaminación es en CS2, de hasta 50 mm, con una resistencia a la compresión de 32 MPa, mientras que en CS1 es solo de 25 MPa. Estos valores son una consecuencia directa de la razón a/c (Mehta y Monteiro, 2013). La Figura 12 muestra la relación entre la profundidad de la delaminación detectada y la resistencia a la compresión en comparación con los resultados de otras investigaciones (Kee et al., 2012; Farrag et al., 2016; Yehia et al., 2007; Maierhofer et al., 2007; Alfredo-Cruz et al., 2015), observándose la tendencia de que a mayor resistencia a la compresión, mayor detección de la profundidad de las delaminaciones.

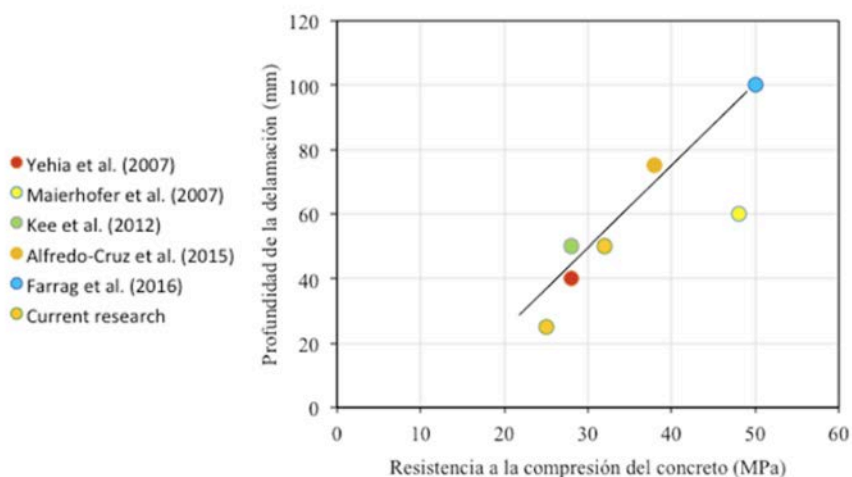


Figura 12. Relación entre la profundidad de la delaminación por termografía y la resistencia a la compresión del concreto.

Washer (2012) establece que las delaminaciones simuladas representan un modelo de comportamiento ideal y que los valores del contraste térmico deberían ser mucho mayores en comparación con las delaminaciones reales. Sin embargo, la detección de las diferencias y de los cambios térmicos durante el día registrados por las cámaras termográficas demuestra buena precisión y confiabilidad en la detección de las delaminaciones.

Esta técnica entrega información sobre los defectos internos, midiendo la radiación emitida por la superficie de

concreto. Sin embargo, la información está enfocada principalmente en la ubicación del defecto y área problemática en los periodos de tiempo adecuados, pero no proporciona información sobre la naturaleza de las delaminaciones que, en muchos casos, se relacionan con la corrosión, así como con las fallas que se producen en los procesos constructivos.

5. Conclusión

Este documento presenta los resultados obtenidos por termografía infrarroja en la detección de las delaminaciones en elementos de puentes, con diferentes razones a/c, expuestos al contacto directo con la radiación solar. Para el estudio se prepararon probetas de ensayo y un periodo de inspección de 18 días.

Los resultados muestran que la inspección es eficiente para detectar los defectos en la superficie del concreto, pero existen periodos de tiempo cuando la inspección es ineficiente, especialmente durante los periodos de calentamiento y enfriamiento, en los que los contrastes térmicos indican valores mínimos.

La razón a/c y su influencia en la densidad del concreto y la resistencia a la compresión influyen en los resultados. El concreto con menor razón a/c obtuvo los mejores resultados en la detección de la delaminación, a

diferencia de la probeta de ensayo preparada con la razón a/c más alta, donde la detección se vio limitada, demostrando que con una mejor calidad del hormigón se obtienen mejores resultados.

La termografía infrarroja es una herramienta importante para la inspección de las estructuras de concreto, especialmente de puentes, donde pueden aparecer delaminaciones de difícil acceso. Sin embargo, el ensayo se vio fuertemente influenciado por las condiciones medio ambientales y, además, existen algunas limitaciones para detectar los defectos profundos y en los concretos de baja calidad.

La combinación con otros ensayos puede ayudar a mejorar la caracterización de estos defectos, además de ayudar a complementar la información. Los últimos avances tecnológicos de las cámaras termográficas, los procedimientos de inspección y el análisis de datos entregan mayor confianza en la detección de la delaminación.

6. Referencias

- AASHTO (2011).** Manual for Bridge Evaluation, second ed., Washington D.C.: AASHTO Publications.
- ABNT (2007).** NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ASTM (2013).** D4788 – 03: Standard test method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Aggelis, D., Kordatos, E., Soulioti, D., Matikas, T. (2010).** Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(10): 1888-1897. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.014>
- Alfredo-Cruz, R., Quintero-Ortiz, L., Galán-Pinilla, C., Espinosa-García, E. (2015).** Evaluación de técnicas no destructivas en elementos de concreto para puentes. *Revista Facultad de Ingeniería*, 24(40): 83-96.
- Al-Hadharmi, L., Maslehuddin, M., Shameem, M., Ali, M. (2012).** Assessing concrete density using infrared thermographic (IRT) images. *Infrared Physics & Technology*, 55(5): 442-448. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.04.004>
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B., Saravanan, T., Philip, J., Jayakumar, T. (2013).** Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, 60:35-55. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Farrag, S., Yehia, S., Qaddoumi, N. (2016).** Investigation of Mix-Variation Effect on Defect-Detection Ability Using Infrared Thermography as a Nondestructive Evaluation Technique. *Journal of Bridge Engineering*, 21(3): 1-15. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000779](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000779)
- FLIR (2013).** User's manual FLIR Exx Series, Wilsonville: FLIR Systems.
- Hiasa, S., Birgul, R., Catbas, N. (2017).** A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges. *Computers & Structures*, 190: 205-218. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.05.011>
- Hiasa, S., Catbas, F., Matsumoto, M., Mitani, K. (2016).** Monitoring concrete bridge decks using infrared thermography with high speed vehicle. *Structural Monitoring and Maintenance*, 3(3): 277-296.
- Kee, S., Oh, T., Popovics, J., Arndt, R., Zhu, J. (2012).** Nondestructive bridge deck testing with air-coupled impact-echo and infrared thermography. *Journal of Bridge Engineering*, 17(6): 928-939. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000350)
- Maierhofer, Ch., Arndt, R., Röllig, M., (2007).** Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. *Infrared Physics & Technology*, 49(3): 213-217. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.06.007>
- Mehta, K., Monteiro, P. (2013).** Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, fourth ed., New York: McGraw-Hill.
- Oh, T., Kee, S., Arndt, R., Popovics, J., Zhu, J. (2013).** Comparison of NDT Methods for Assessment of a Concrete Bridge Deck. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(3): 305-314. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000441](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000441)
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S., Jameel, M. (2016).** Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 107: 58-86. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Rocha, J., Póvoas, Y. (2017).** A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte. *Revista ALCONPAT*, 7(3): 200-214. Doi: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- Vaghefi, K., Oats, R., Harris, D., Ahlborn, T., Brooks, C., Endsley, K., Roussi, C., Shuchman, R., Burns, J., Dobson, R. (2012).** Evaluation of Commercially Available Remote Sensors for Highway Bridge Condition Assessment. *Journal of Bridge Engineering*, 17(6): 886-895. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000303](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000303)
- Vemuri, S., Atadero, R. (2017).** Case Study on Rapid Scanning Techniques for Concrete Bridge Decks with Asphalt Overlay: Ground-Penetrating Radar and Infrared Thermography. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 22(2): 1-8. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000313](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000313)
- Washer, G. (2012).** Advances in the use of thermographic imaging for the condition assessment of bridges. *Bridge Structures*, 8(2): 81-90. Doi: <https://doi.org/10.3233/BRS-2012-0041>



- Washer, G., Fenwick, R., Bolleni, N. (2010).** Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete. *Journal of Bridge Engineering*, 15(4): 384-390. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000117)
- Watase, A., Birgul, R., Hiasa, S., Matsumoto, M., Mitani, K., Catbas, F. (2015).** Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation. *Construction and Building Materials*, 101: 1016-1030. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.156>
- Yehia, S.; Abudayyeh, O.; Nabulsi, S.; Abdelqader, I. (2007).** Detection of Common Defects in Concrete Bridge Decks Using: Nondestructive Evaluation Techniques. *Journal of Bridge Engineering*, 12(2): 215-225. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:2\(215\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:2(215))

