

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado: Revisión del estado del arte

J. H. A. Rocha^{1*}, Y. V. Póvoas¹

*Autor de Contacto: jhar_pec@poli.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>

Recepción: 06/07/2017 | Aceptación: 06/09/2017 | Publicación: 29/09/2017

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar las metodologías, ventajas y limitaciones del ensayo de la termografía infrarroja para la inspección de puentes de hormigón armado. Se realizó una revisión sistemática de artículos y de material académico relativo al área. Esta revisión se centra principalmente en la aplicación pasiva y en estudios tanto de laboratorio como de campo. Se utilizó un abordaje crítico de la información disponible con relación a su alcance. El ensayo se presenta como una alternativa real para la detección de defectos en estas estructuras, siendo más eficaz cuanto más superficiales sean estas anomalías. Dependiendo del trabajo a realizar, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones para obtener mejores resultados. Además, el ensayo es más eficaz en combinación con otros ensayos.

Palabras claves: termografía infrarroja; inspección de puentes; patologías del concreto.

Citar como: J. H. A. Rocha, Y. V. Póvoas (2017), “*La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado: Revisión del estado del arte*”, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 200-214, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>

¹ Universidad de Pernambuco, Brasil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2018.

Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art

ABSTRACT

This article aims to present the methodologies, advantages and limitations of the infrared thermography test for the inspection of reinforced concrete bridges. A systematic review of area-related articles and academic material was carried out. This review focus mainly on passive thermography in both laboratory and field studies. A critical approach to the available information regarding its scope was used. This technique is presents a real alternative for detecting defects in reinforced concrete bridges because the more superficial the anomalies in these structures are, the more effective it is. Also, depending on the work to be carried out, a variety of factors should be taken into consideration for better results. Moreover, infrared thermography is more effective when combined with other non-destructive tests.

Keywords: infrared thermography; bridge inspection; concrete pathologies.

A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar as metodologias, vantagens e limitações do ensaio da termografia infravermelha para a inspeção de pontes de concreto armado. Foi realizada uma revisão sistemática de artigos e de material acadêmico relativo à área. Esta revisão foca-se principalmente na aplicação passiva e em estudos tanto de laboratório quanto de campo. Utilizou-se uma abordagem crítica da informação disponível quanto a seu alcance. A termografia infravermelha apresenta-se como uma alternativa real para a detecção de defeitos nestas estruturas, sendo mais eficaz quanto mais superficiais sejam estas anomalias. Dependendo do trabalho a ser realizado é necessário levar em conta algumas considerações para obter melhores resultados. E é eficaz em combinação com outros ensaios.

Palavras chaves: termografia infravermelha; inspeção de pontes; patologias do concreto.

1. INTRODUCCIÓN

La inspección y mantenimiento de estructuras de hormigón armado son actividades importantes para la preservación de la vida útil, la garantía de la seguridad y la funcionalidad para los usuarios (Bagavathiappan et al., 2013). Sin embargo, a medida que las estructuras envejecen, estas actividades son cada vez más complejas de ser realizadas; no obstante, deben en todo momento determinar y controlar la integridad estructural, además de evaluar la naturaleza del daño (Chang; Flatau; Liu, 2003; Rehman et al., 2016).

Los puentes son estructuras que se deterioran rápidamente, especialmente sus losas, porque están directamente expuestas al tráfico y al medio ambiente (Gucunski et al., 2015). La degradación del concreto, la corrosión de acero, el debilitamiento de las conexiones, entre otros problemas, son causas de preocupación permanente en el mantenimiento de puentes. Una correcta inspección y evaluación de los puentes y sus partes es necesaria para evitar un deterioro de la integridad estructural y del servicio con el tiempo (Islam et al., 2014).

En los Estados Unidos los puentes se inspeccionan dos veces al año (GPO, 2015) y el 40% de los puentes evaluados se clasifican como estructuralmente deficientes y no están en condiciones de funcionalidad (Pines y Aktan, 2002). Estas estructuras están diseñadas y construidas para funcionar

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado:

Revisión del estado del arte

durante al menos 50 años, pero el promedio de vida de un puente en los Estados Unidos es de 42 años, al contrario de las especificaciones técnicas (Herrmann, 2013).

En Brasil la situación es similar. De acuerdo con la NBR 9452 (ABNT, 2016), los puentes deben ser inspeccionados cada año, pero sólo con una inspección rutinaria. Las inspecciones más detalladas deben ocurrir entre 5 y 8 años, dependiendo del caso. Las investigaciones en el área (Mendes; Moreira; Pimienta, 2012; Pintan et al., 2015; Vitório y Barros, 2012) muestran que más de un tercio de los puentes estudiados poseen características deficientes, asociadas en muchos casos a la falta de mantenimiento adecuado u oportuno.

Aunque la inspección visual es el método más ampliamente utilizado en la inspección de estructuras de hormigón y el primer paso en la evaluación de estructuras (Chang; Flatau; Liu, 2003; Estes y Frangopol, 2003; ACI, 2013; Alani; Aboutalebi; Killic, 2014; Rehman et al., 2016), su alcance se limita sólo al análisis cualitativo de forma subjetiva, porque depende del criterio del inspector (Jain y Bhattacharjee, 2011), además de no ser capaz de detectar problemas internos de la estructura, a menos que sea un deterioro avanzado que presente señales externas, siendo éste un caso indeseado y que debe ser evitado (Vilbig, 2014).

Los ensayos no destructivos proporcionan información relevante del estado de la estructura (McCann y Forde, 2001), lo que permite evaluar rápidamente y eficazmente los daños (Chang; Flatau; Liu, 2003), de esta forma evitar el colapso prematuro e imprevisible (Rehman et al., 2016). Varios investigadores han demostrado la aplicación de estos métodos para la inspección y la evaluación de estructuras, proporcionando orientaciones de sus usos (Clark; McCann; Forde, 2003; Scott et al., 2003; Meola, 2007). McCann y Forde (2001) presentan una variedad de métodos no destructivos adecuados para obras de construcción civil, y específicamente Rehman et al. (2016), presenta en detalle los ensayos no destructivos para la inspección de puentes.

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo se ha utilizado para la inspección de estructuras civiles con resultados satisfactorios (Meola, 2007; Fox; Goodhew; Wilde, 2016; Hiasa; Birgul; Catbas, 2016), y su aplicación específica en la inspección de puentes está cada vez más consolidada (Watase et al., 2015; Ellenberg et al., 2016; Dabous et al., 2017; Hiasa; Birgul; Catbas, 2017a). Sin embargo, presenta algunas limitaciones en cuanto a la profundidad de detección de defectos, la influencia de las condiciones ambientales, el horario de recolección de datos, entre otros. En este sentido, el objetivo de este artículo es analizar los alcances de la termografía infrarroja en la inspección de puentes de hormigón armado, describiendo los conceptos básicos de operación de la termografía infrarroja, además de las metodologías y técnicas de análisis de la información, buscando proporcionar una mejor evaluación de diagnóstico de patologías en puentes.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Revisión histórica y principio de funcionamiento

Todos los objetos con temperatura por encima del cero absoluto (0 K) emiten radiación en la banda infrarroja del espectro electromagnético. De acuerdo con la longitud de onda, la radiación infrarroja está en el rango de 0.75 a 1000 μm (micrómetro), ubicado entre la banda visible y la microondas (Figura 1) (Clark; McCann; Forde, 2003; Meola, 2012; Bagavathiappan et al., 2013).

La radiación infrarroja fue descubierta por William Herschel en 1800, sin embargo, la primera imagen térmica fue hecha por su hijo, John Herschel en 1840 (FLIR, 2013). A pesar de este progreso, la termografía infrarroja no fue utilizada hasta las últimas décadas por la falta del desarrollo de equipamientos y conocimientos técnicos (Bagavathiappan et al., 2013).

En la termografía infrarroja, la radiación infrarroja emitida por un objeto se detecta de una manera sin contacto por un detector infrarrojo de la cámara usando la ecuación de Stefan-Boltzmann (1) y de esta forma se obtiene la temperatura del objeto (Clark; McCann; Forde, 2003; Washer, 2012; ACI, 2013; Watase et al., 2015).

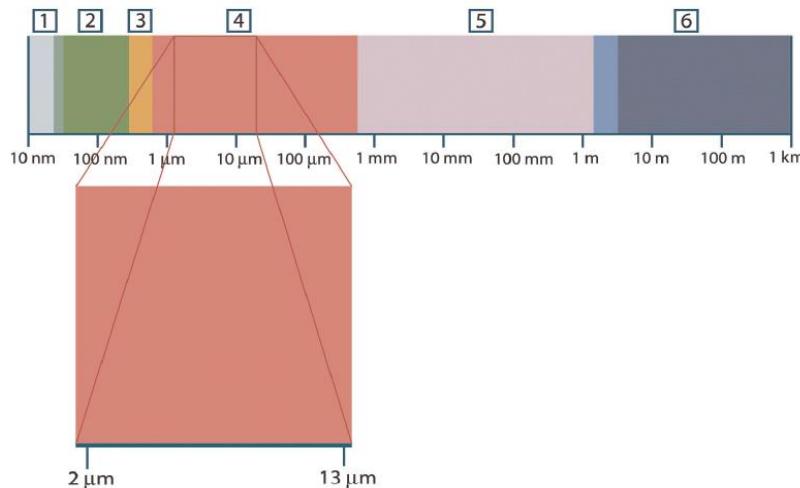


Figura 1. Espectro electromagnético. 1: Rayos X; 2: Ultravioleta; 3: Visible; 4: Infrarrojo; 5: Microondas; 6: Ondas de radio (FLIR, 2013)

$$E = \frac{q}{A} = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

Donde E es la radiación emitida por el objeto (W/m^2), q es el grado de emisión de energía (W), A es el área de la superficie emisora (m^2), T es la temperatura absoluta (K), σ es la constante de Stefan-Boltzmann de valor $5.676 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, y ε es la emisividad de la superficie emisora. La emisividad es la medida de la eficiencia de una superficie para actuar como un emisor (Clark; McCann; Forde, 2003). Un cuerpo negro perfecto tiene una emisividad de valor igual a uno, considerado como un emisor perfecto, sin embargo, para otras superficies el valor es inferior a uno. En el caso del concreto se tiene una emisividad relativamente elevada, entre 0.9-1 (Washer; Fenwick; Bolleni, 2010).

2.2 Metodología y análisis

La aplicación de la termografía infrarroja se puede dividir en dos categorías: activa y pasiva, dependiendo de los recursos empleados de calor (Kee et al., 2012; Rehman et al., 2016). La termografía pasiva no requiere fuentes de estimulación externa (Oh et al., 2013), utiliza la energía solar y la temperatura ambiente como principales recursos para calentar los objetos, y es la técnica utilizada para inspección de puentes (Kee et al., 2012; Vaghefi et al., 2012; Alfredo-Cruz et al., 2015), como también para otras estructuras y otros campos (Buyukozturk, 1998; Lahiri et al., 2012; Barreira; Almeida; Delgado, 2016; Fox; Goodhew; Wilde, 2016; O'Grady; Lechowska; Harte, 2016). En contraste, la termografía activa requiere fuentes externas de estimulación de calor (Kee et al., 2012; Rehman et al., 2016), puede incluso ser subdividida de acuerdo con la naturaleza de la estimulación como: Pulsed, Lock-in, Pulsed-Phase, entre otros (Maladague, 2001). La aplicación de las técnicas de termografía activa está relacionada con la detección de defectos en metales, con el monitoreo de procesos industriales, entre otros (Meola et al., 2002; Montanini, 2010; Yuanlin et al., 2015; Zhao et al., 2017).

La termografía infrarroja tiene dos tipos de mediciones y análisis. La primera es la cuantitativa, la cual consiste en obtener la temperatura del objeto con precisión; la segunda es la cualitativa que es la obtención de valores relativos de puntos calientes en relación a otras partes del mismo objeto, utilizándolas como referencia. En un análisis cualitativo, algunas aplicaciones no requieren la determinación de la temperatura exacta, sólo temperaturas relativas, recogiendo datos para ser interpretados de una forma más rápida; sin embargo, el análisis puede tener fallas de precisión. En un análisis cuantitativo, el procedimiento es más riguroso y sirve para aplicaciones específicas (Jadin y Taib, 2012).

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado:
Revisión del estado del arte

2.3 Ventajas y limitaciones

La termografía infrarroja se presenta como una técnica: rápida, no invasiva, sin contacto, que permite el registro de las variaciones dinámicas en tiempo real, que puede aplicarse a grandes distancias, que puede analizar e inspeccionar grandes áreas en pequeños intervalos de tiempo, de resultados fáciles y de rápida interpretación (Yehia et al., 2007; Washer; Fenwick; Bolleni, 2010; Sham; Lo; Memon, 2012; Watase et al., 2015; Hiasa; Birgul; Catbas, 2016; Rehman et al., 2016); además de tener una instrumentación simple, en la mayoría de los casos, sólo es necesaria una cámara termográfica, el apoyo de la cámara y una salida de vídeo para observar imágenes térmicas (Bagavathiappan et al., 2013).

A pesar de las muchas ventajas ofrecidas por el método en la inspección, el equipo puede ser caro, no es sensible para detectar la profundidad de los defectos y anomalías en el hormigón, y el ensayo está altamente influenciado por las condiciones ambientales, tales como: viento, radiación solar, humedad y emisividad de la superficie (Manning; Holt, 1980; Yehia et al., 2007; Washer; Fenwick; Bolleni, 2009; ACI, 2013).

2.4 Cámaras termográficas

Las cámaras térmicas han sufrido muchos cambios en las últimas décadas; las primeras tuvieron baja resolución espacial, altos niveles de ruido, poco rango dinámico y almacenamiento de datos limitado (Zhang; Tsai; Machin, 2009). Cada día las cámaras son más livianas y portátiles, con nuevos tipos de detectores infrarrojos con mejor resolución y precisión, cubriendo cada vez más aplicaciones (Bagavathiappan et al., 2013).

En el momento de la elección de una cámara termográfica se deben tener en cuenta algunos parámetros de rendimiento, tales como: la banda espectral, la resolución espacial, la resolución de temperatura, el rango de temperatura y la frecuencia de fotogramas. Sin embargo, otros factores pueden ser considerados como: potencia, peso, tamaño, capacidad de procesamiento de imagen, calibración, capacidad de almacenamiento, costo, servicio, entre otros; dependiendo del tipo de trabajo a realizar (Venkataraman y Raj, 2003).

La banda espectral es la porción de la región infrarroja en la que la cámara es capaz de operar. Se sabe que a medida que la temperatura de un objeto aumenta, la radiación térmica emite longitudes de onda cortas (Bagavathiappan et al., 2013); sin embargo, los objetos que se encuentran en la temperatura ambiente emiten longitudes de onda largas (7.5-14 μm); por lo tanto, en este caso sería preferible cámaras con este sistema de longitud de onda porque las mediciones no serían afectadas por la radiación solar, que generalmente están en bandas de longitud corta. Por otro lado, las cámaras con sistemas de onda corta (2-5 μm) pueden tener un mejor rendimiento en días nublados o por la noche, ya que la radiación solar no podría influir en los resultados por tener el mismo rango de longitud de onda (Jaldin y Taib, 2008).

La calidad de la imagen depende de cuán grande es la resolución espacial. La resolución espacial es la capacidad de la cámara termográfica para distinguir dos objetos en el campo visual. Depende directamente del sistema de lentes, del tamaño del detector y de la distancia entre el objeto y la cámara. Cuanto mayor sea esa distancia, menor será la resolución espacial (Venkataraman y Raj, 2003).

La resolución de la temperatura es el mínimo diferencial térmico que puede ser detectado por la cámara termográfica. Depende de muchos parámetros como: la temperatura del objeto y del medio ambiente, la distancia de la cámara al objeto, los filtros, entre otros (Venkataraman y Raj, 2003).

El rango de temperatura se refiere a los valores máximo y mínimo que la cámara es capaz de medir. Estos valores pueden variar según las especificaciones de la cámara. La frecuencia de fotogramas es la cantidad de cuadros que se puede adquirir por segundo que es importante en el caso de monitorear objetos en movimiento o eventos dinámicos (Venkataraman y Raj, 2003).

3. INSPECCIÓN DE PUENTES

El concepto de la aplicación de la termografía infrarroja para la inspección se basa en que los vacíos, defectos o anomalías del concreto afectan a las propiedades térmicas de transferencia de calor de la estructura. Conforme la temperatura sube durante el día, las áreas donde están los defectos interrumpen la transferencia de calor en el interior del concreto, calentándose rápidamente y esto es porque los defectos son llenados con aire o agua, que tienen una conductividad térmica diferente a la del hormigón. Por el contrario, por la noche, cuando las temperaturas caen, las áreas donde están los defectos son enfriados más rápido que áreas sin problemas (Figura 2). Las cámaras pueden detectar estos defectos a partir de la medición de la radiación emitida por la superficie del hormigón por la ecuación de Stefan-Boltzmann (1) (Maser y Roddis, 1990; Washer; Fenwick; Bolleni, 2010; Sham; Lo; Memon, 2012; ACI, 2013; Gucunski et al., 2013; Farrag; Yehia; Qaddoumi, 2016; Rehman et al., 2016; Vemuri y Atadero, 2017).

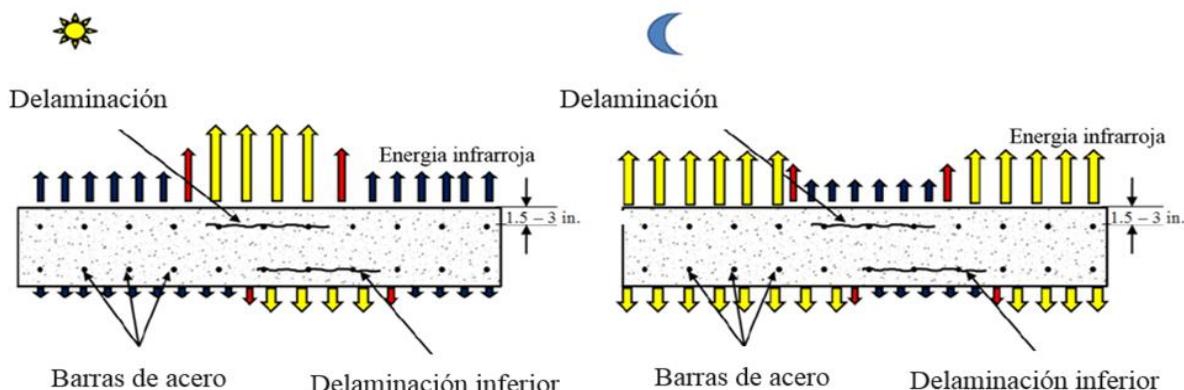


Figura 2. Energía infrarroja emitida a partir del concreto en condiciones de día y de noche
(Washer et al., 2015)

La radiación, conducción y convección son los principales mecanismos de transferencia de calor que afectan el flujo de calor a través del hormigón. Aunque la energía radiante es el parámetro que puede ser medido por una cámara termográfica, la conductividad térmica dentro del hormigón y la convección de calor alrededor del concreto influye en la toma de termogramas (Vaghafi et al., 2011).

La detección de defectos o delaminaciones en el concreto se realiza a través del gradiente o contraste térmico (ΔT), definido por la ecuación (2) (Washer et al., 2015).

$$\Delta T = T_D - T_C \quad (2)$$

Donde T_D es la temperatura que está por encima de la superficie del defecto, y T_C es la temperatura del concreto intacto.

La aplicación de la termografía infrarroja para la inspección de edificios y de sus componentes está ampliamente regulada (ASTM, 2013a; ASTM, 2015a; ASTM, 2015b); y específicamente se tiene la norma D4788-03 (ASTM, 2013b) para la inspección de puentes de hormigón armado.

La aplicación en estructuras de hormigón está enfocada principalmente en la detección de: defectos superficiales, porosidad, fisuras, evaluación de daños (McCann y Forde, 2001; Maierhofer; Arndt; Röllig, 2007; Poblete y Pascual, 2007; Arndt, 2010; ACI, 2013; Baggathiappan et al., 2013) y, particularmente en el caso de puentes de hormigón armado, en detectar delaminaciones y vacíos (Figura 3), a través de una manera visual en los termogramas o por gradientes térmicos calculados con la ecuación (2) (Clark; McCann; Forde, 2003; Washer; Fenwick; Bolleni, 2010; ASTM, 2013b; Gucunski et al., 2013).

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado:
Revisión del estado del arte

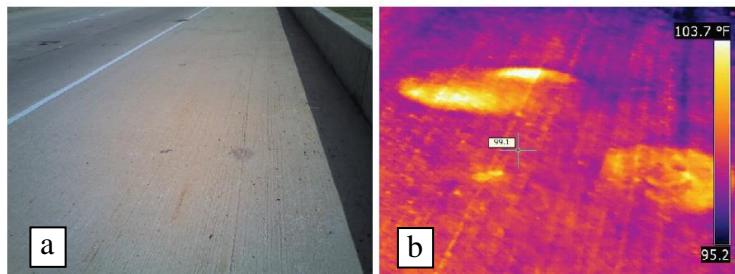


Figura 3. Detección de delaminaciones: a) Fotografía digital y b) Termograma (Washer; Fenwick; Bolleni, 2009)

Los defectos que presenten mayores gradientes térmicos son más detectables incluso a grandes profundidades (Washer et al., 2015). En este sentido, la norma D4788-03 (ASTM, 2013b) indica que este gradiente debe ser de al menos 0.5°C para tener una buena precisión en la detección. Sin embargo, Clark, McCann y Forde (2003) detectaron defectos y delaminaciones en la estructura interna de puentes de hormigón armado y de albañilería, ubicados en baja temperatura ambiente, e indicó que estos defectos pueden ser detectados cuando el gradiente es de $0.2\text{--}0.3^{\circ}\text{C}$, aproximadamente. Washer, Fenwick y Bolleni (2010) afirman que la termografía infrarroja es apropiada en la inspección de puentes en las partes expuestas al sol, pues genera grandes gradientes, sin embargo, en casos extremos, el sol puede limitar la técnica generando falsas detecciones (Washer et al., 2015). En cuanto a las partes no expuestas a la luz solar directa, Figura 4a, Washer (2012) concluye que los delaminaciones y defectos pueden ser detectados cuando las variaciones de temperatura durante el día y por la noche sean lo suficientemente grandes para generar gradientes, Figura 4b, notando que durante los períodos de enfriamiento y calentamiento del día los gradientes térmicos son pequeños, resultando ineficaz la inspección durante estos períodos. Farrag, Yehia y Qaddoumi (2016) utilizó un gradiente mínimo de 0.8°C para la detección de delaminaciones además de la detección visual en los termogramas.

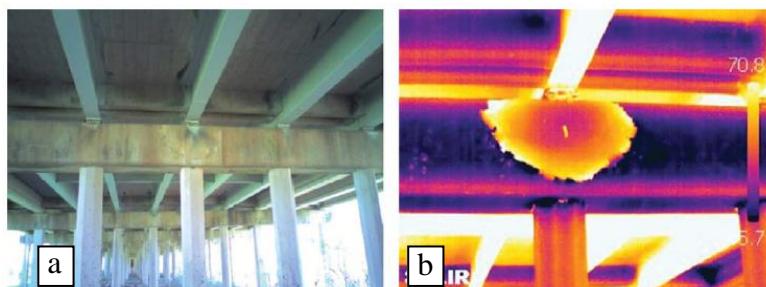


Figura 4. Aplicación en la infraestructura de puentes: a) Fotografía digital y b) Termograma (Washer, 2012)

Los factores procesales se refieren a las condiciones experimentales y al conocimiento anterior del objeto de estudio; se pueden minimizar utilizando termografistas calificados para la obtención de datos y para su respectiva corrección o interpretación (Buyukozturk, 1998; Uemoto, 2000; Vemuri y Atadero, 2017).

Las condiciones ambientales se refieren a su influencia directa en las mediciones (Washer et al., 2015). La termografía infrarroja es una técnica muy sensible en relación a las condiciones ambientales (Yehia et al., 2007; Oh et al., 2013). La exposición al sol se considera la principal fuerza para generar gradientes térmicos, ya que afecta los valores de temperatura medidos, generando energía térmica en la superficie del hormigón. De igual modo, el aumento de la temperatura ambiente produce un aumento de la temperatura de los objetos, a diferencia de eventos como: humedad, lluvia o nieve que reducen la temperatura de los objetos; sin embargo, mayores

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado: Revisión del estado del arte

variaciones de temperatura durante el día pueden generar mayores gradientes térmicos (Washer; Fenwick; Bolleni, 2010). El viento también puede interferir en la temperatura de los objetos a ser estudiados, en mayor grado cuando el viento es fuerte, por los efectos de corte de temperatura generados en la superficie (Davis, 2003).

A continuación, se describen las principales capacidades y limitaciones de la técnica en la inspección de puentes de hormigón armado en relación: a la detección de la profundidad y tamaño de delaminaciones, al horario ideal de colección de datos, a la influencia de la calidad de hormigón, a la velocidad de obtención de datos y en la combinación con otros ensayos.

3.1 Profundidad y tamaño de delaminaciones y horario de inspección

La detección de la profundidad y el tamaño de las delaminaciones ha sido un punto bien investigado. Muchos autores utilizan defectos artificiales para ser captados con la cámara infrarroja y de esta forma evaluar el alcance de la técnica. De la misma forma existen muchas recomendaciones del horario ideal para la obtención de datos (Hiasa, 2016). En la Tabla 1 se presenta un resumen de los principales trabajos en la detección de delaminaciones en relación al tamaño, la profundidad y el horario de inspección.

En la revisión de la literatura (Tabla 1) se observa que, cuanto mayor y más superficial es el área del defecto, la detección es más fácil. En este sentido, Farrag, Yehia y Qaddoumi (2016) concluyeron que si la relación R/d (R : dimensión corta del defecto y d : profundidad del defecto desde la superficie) es mayor que 1, los defectos son detectados; si esta relación R/d es igual a 0.45, son detectables hasta una profundidad de 10 cm.

En trabajos más recientes con relación a la profundidad de detección, Hiasa, Birgul y Catbas (2017b) presentan una metodología de procesamiento de datos a través de modelado numérico para un mejor análisis y posterior evaluación, donde los resultados para los defectos a 1.27 y 2.54 cm de profundidad fueron detectados con mayor precisión que un simple análisis de colores en el termograma.

El horario de inspección es un punto controvertido, ya que las recomendaciones de los autores son contradictorias en algunos casos, pero depende de las condiciones ambientales del lugar del objeto en estudio; algunos autores (Uemoto, 2000; Watase et al., 2015; Hiasa et al., 2016) recomiendan la inspección de puentes durante la noche para eliminar los efectos de la radiación solar, y tener una mejor visión entre el defecto y las regiones intactas, evitando falsas detecciones. Sin embargo, Hiasa, Birgul y Catbas (2017a) muestran el potencial de los modelos de elementos finitos con termografía infrarroja para la inspección de puentes, proporcionando la estimación de los parámetros de detección como profundidad y tamaño de defectos e, incluso, horarios ideales de inspección.

3.2 Calidad del concreto

Farrag, Yehia y Qaddoumi (2016) utilizaron varias mezclas de concreto para observar su influencia en la detección de defectos, demostrando que el concreto de alta resistencia y, por lo tanto, con una mayor densidad y mayor conductividad térmica es mejor para la detección de defectos utilizando la técnica.

De acuerdo con la literatura, no fueron claramente establecidos límites de detección de delaminaciones en relación a la profundidad y a la calidad del concreto, relación a/c y resistencia a la compresión. Yehia et al. (2007) encontraron vacíos y defectos a una profundidad de 4 cm en un concreto con resistencia a la compresión de 28 MPa, mientras que Kee et al. (2012) encontraron delaminaciones a 5 cm en un concreto de la misma resistencia. Maierhofer et al. (2006) encontraron vacíos a una profundidad de 6 cm en un concreto de 48 MPa, utilizando termografía infrarroja activa. Alfredo-Cruz et al. (2015), en un hormigón de 38 MPa y una relación a/c de 0.35, detectaron delaminaciones hasta una profundidad de 5 cm, siendo los defectos a 7.5 cm los menos visibles.

Farrag, Yehia y Qaddoumi (2016) encontraron delaminaciones y vacíos a 10 cm de profundidad con un concreto de resistencia a la compresión de 50 MPa.

Tabla 1. Detección de delaminaciones en relación al tamaño, a la profundidad y al horario

| Autores | Profundidad de la delaminación (cm) | Área de la delaminación (cm ²) | Detección | Horario de inspección recomendado |
|----------------------------------|-------------------------------------|--|-----------|-----------------------------------|
| Sakagami y Kubo (2002) | 2 - 3 - 5 | 10x10 | Si | Termografía activa |
| | 10 | 10x10 | No | |
| Maierhofer et al. (2006) | 2 - 4 - 6 - 8 | 20x20 | Si | Termografía activa |
| | 2 - 4 - 6 - 8 | 10x10 | Si | |
| Meola (2007) | 1.5 a 7 | 12.5 a 78.5 | Si | Termografía activa |
| Abdel-Qader et al. (2007) | 2.54 a 7 | 19.35 a 103 | Si | Termografía activa |
| | 8.9 a 10.16 | 14.5 a 103 | No | |
| Yehia et al. (2007) | 1.9 - 2.5 - 5.1 | 3.8x3.8 a 10.3x10.2 | Si | De 10 horas a las 15 horas |
| | 5.6 - 10.1 | 3.8x3.8 a 10.3x10.2 | No | Ninguna hora del día |
| Cheng, Cheng y Chiang (2008) | 0.5 - 1 - 1.5 - 2 - 3 | 10x10 | Si | Termografía activa |
| | | 5x5 | Si | |
| Washer, Fenwick y Bolleni (2009) | 5.1 | 30x30 | Si | 5 a 7 horas* |
| | 7.6 | 30x30 | Si | 7 a 9 horas* |
| Washer, Fenwick y Bolleni (2010) | 2.5 | 30x30 | Si | 5 horas e 40 minutos* |
| | 12.7 | 30x30 | Si | Más de 9 horas* |
| Washer (2012) | 2.5 | 30x30 | No | 1 hora* |
| | 5.1 | 30x30 | No | 1 hora y 30 minutos* |
| | 7.6 | 30x30 | No | 2 horas* |
| Kee et al. (2012) | 6.35 | 30.5x30.5 | Si | 45 minutos |
| | | 61x30.5 | Si | 3 horas y 45 minutos* |
| | | 61x61 | Si | 7 horas y 45 minutos* |
| Gucunski et al. (2013) | 6.35 | 30.5x30.5 y 61x30.5 y 61x61 | Si | 40 minutos* |
| | | | No | Medio día |
| Vaguefi et al. (2015) | 5.1 - 7.6 | Delaminaciones reales | Si | Medio día |
| Watase et al. (2015) | 1-2-3 | 30x30 | Si | Medio día |
| | | 30x30 | Si | Media noche |
| Alfredo-Cruz et al. (2015) | 2.5 - 5.0 - 7.5 | 15x15 | Si | De 8 horas a las 11 horas |
| Hiasa et al. (2016) | 1.27 - 2.54 - 5.08 | 10.2x10.2 | Si | Período nocturno |
| | 7.62 | 10.2x10.2 | No | Ninguna hora del día |

*Después del amanecer

3.3 Velocidad de obtención de datos

Hiasa et al. (2016) realizó la comparación de tres cámaras, y el efecto de la velocidad en la toma de termogramas. La realización de los experimentos fue para velocidades de 0 km/h y 48 km/h, concluyendo que la cámara de mayor tecnología tiene mejores resultados que aquellos con tecnología inferior, capturando no sólo termogramas de forma estática, sino también en

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado: Revisión del estado del arte

movimiento. Además, los resultados revelan que la cámara de 640x480 píxeles es más eficiente en comparación con las cámaras de 320x240 píxeles, ya que permite analizar mayores grandes en menores tiempos con buena precisión.

3.4 Combinación con otros ensayos no destructivos

La termografía infrarroja ha sido ampliamente utilizada en combinación con otros ensayos no destructivos para confirmar o complementar información, y de esa forma obtener un análisis más completo de la calidad de la estructura. Yehia et al. (2007) comparó los resultados obtenidos con diferentes técnicas de evaluación no destructiva utilizadas: termografía infrarroja, IE (Impact Echo) y GPR (Ground Penetrating Radar) usados en la inspección y evaluación de puentes. Se concluyó que cada técnica atiende objetivos específicos y juntas proporcionan más información sobre el estado de la estructura.

Aggelis et al. (2010) estudiaron la caracterización de fisuras subsuperficiales en el hormigón. Utilizó la termografía infrarroja para detectar su posición, posteriormente, usó el ensayo de ultrasonido para un estudio más detallado de la profundidad.

Kee et al. (2012) realizaron una fusión entre las técnicas no destructivas de IE y termografía infrarroja, demostrando que la combinación de los datos obtenidos permite una detección coherente, práctica y sensible de defectos. Oh et al. (2013) hicieron una comparación de estos mismos métodos con la técnica de la cadena de arrastre, siendo los resultados de los tres ensayos comparables; sin embargo, la cadena de arrastre se presentó como menos precisa y confiable para la detección de delaminaciones en puentes, a pesar de ser el más económico, es tecnológicamente limitado y subjetivo, pues depende de la experiencia del operador.

Vemuri y Atadero (2017) y Dabous et al. (2017) consideran que la combinación de la termografía infrarroja y GPR tiene muchas ventajas para la inspección de puentes, complementándose mutuamente, porque pueden detectar corrosión y fisuras en etapas iniciales tanto para defectos como para su cuantificación; incluso, Vemuri y Atadero (2017) comprobaron que la detección es posible cuando existe una capa de asfalto sobre la losa del puente.

Alfredo-Cruz et al. (2015) realizaron el estudio de varios ensayos no destructivos: ultrasonido, termografía infrarroja y esclerómetro para evaluar elementos de puentes. Concluyeron que la combinación de estas técnicas presenta resultados más completos como: la evaluación de la uniformidad y calidad de la matriz de concreto, la detección de delaminaciones y la estimativa de la resistencia a la compresión del concreto.

Ellenberg et al. (2016) demuestra la capacidad de usar UAV (Unmanned Aerial Vehicle) equipado con una cámara termográfica para la identificación de delaminaciones en la inspección de puentes, como se muestra en la Figura 5.

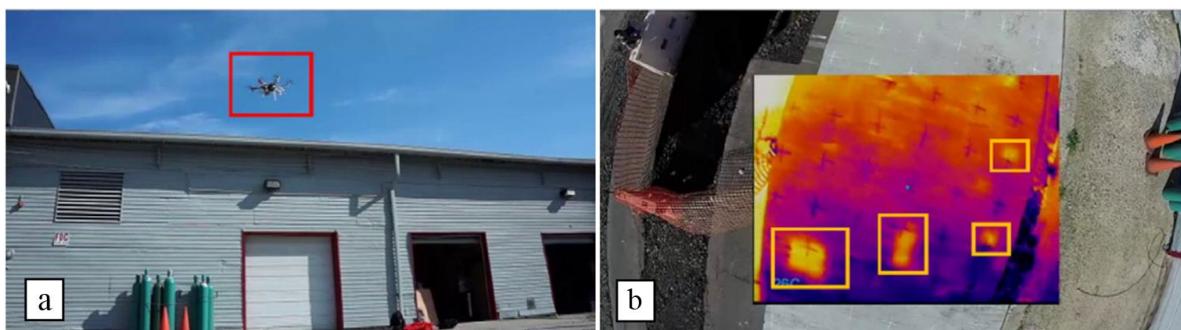


Figura 5. a) UAV sobre la ubicación de las delaminaciones, y b) Delaminaciones identificadas en tiempo real desde el UAV (Ellenberg et al., 2016)

Watase et al. (2015) creen que las tecnologías complementarias a la termografía infrarroja, tales como: GPR, ultrasonido y otros utilizados en el concreto, pueden resultar útiles en el análisis y la

La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado:

Revisión del estado del arte

caracterización de los problemas en el concreto, lo que mejorará las decisiones sobre la evaluación y el mantenimiento de estas estructuras. Vaghefi et al. (2015) presentaron los resultados de la termografía infrarroja con 3DOBS (Three-Dimensional 3D Optical Bridge Evaluation System), un sistema basado en los principios de la fotogrametría, capaz de cuantificar las áreas delaminadas y determinar su porcentaje en relación al área de la losa del puente, siendo esta combinación un método rápido y fácil de localizar y cuantificar áreas deficientes.

Se puede observar que la combinación de la técnica con otros ensayos es generalmente realizada en la inspección de puentes, presentando resultados satisfactorios sobre el estado de estas estructuras.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentaron las diferentes aplicaciones, metodologías, alcances y limitaciones de la termografía infrarroja en la inspección de puentes de hormigón armado, llegándose a las conclusiones que siguen.

El ensayo es una herramienta útil para la inspección de este tipo de estructuras y elementos que pueden ser inaccesibles, porque no requiere contacto directo y puede ser a distancia. Los resultados son inmediatos, lo que puede ser importante para evitar accidentes o situaciones de emergencia.

Existe una buena precisión en la detección de diferentes daños en la estructura, tales como vacíos, delaminaciones y desprendimientos, con algunas limitaciones en cuanto a la profundidad y tamaño de estos defectos. Las investigaciones muestran un avance mayor en la detección de anomalías con la mejora de la tecnología de las cámaras, sin embargo, el horario ideal de inspección sigue siendo una limitación, debido a la dependencia del ensayo con las condiciones ambientales, que varían según el lugar del ensayo. Sin embargo, el desarrollo continuo de herramientas y tecnologías cada vez automatizan el proceso de inspección y análisis de datos, proporcionando mayor confiabilidad en los resultados obtenidos y haciéndose cada vez más eficaz, posibilitando el correcto análisis de mayores áreas en menores tiempos.

La combinación con otros ensayos permite maximizar las ventajas y compensar algunas limitaciones en la inspección y evaluación de las estructuras, lo que mejora la visión de la condición estructural y de la funcionalidad, ayudando en las decisiones de mantenimiento y conservación.

5. AGRADECIMIENTOS

A la CAPES (Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior) por el apoyo financiero.

6. REFERENCIAS

- Abdel-Qader, I., Yohali, S., Abudayyeh, O., Yehia, S. (2008), “*Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks*”. NDT&E International, V.41, No. 5, pp. 395-405. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.12.003>
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016), “*NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento*” (Rio de Janeiro, Brasil: ABNT), p. 48.
- ACI-American Concrete Institute. (2013), “*228:2R-13 Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures*” (Detroit, United States: ACI Publications), p. 82.
- Aggelis, D., Kordatos, E., Soulioti, D., and Matikas, T. (2010), “*Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete*”, Constr. Build.Mater., V.24, No. 10, pp. 1888–1897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.014>

- Alani, A., Aboutalebi, M., Kilic, G. (2014), “*Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges*”, NDT & E International, V.61, pp. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.10.001>
- 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 Fac. Ing., V.24, No. 40, pp. 83-96. <http://dx.doi.org/10.19053/01211129.3850>
- Arndt, R. (2010), “*Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering*”, Infrared Physics & Technology, V.53, No. 4, pp. 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.03.002>
- ASTM. (2013b), “*D4788-03: Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 3. <http://dx.doi.org/10.1520/D4788>
- ASTM. (2015a), “*C1060-11a: Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 7. <http://dx.doi.org/10.1520/C1060-11AR15>
- ASTM. (2015b), “*C1153-10: Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 6. <http://dx.doi.org/10.1520/C1153-10R15>
- ASTM-American Society of Testing Materials. (2013a), “*C1046-95: Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*”, (West Conshohocken, United States: ASTM International), p. 7. <http://dx.doi.org/10.1520/C1046>
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B., Saravanan, T., Philip, J. (2013), “*Infrared thermography for condition monitoring – A review*”, Infrared Physics & Technology, V.60, No. 1, pp. 35-55. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Barreira, E., Almeida, R., Delgado, J. (2016), “*Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components*”, V.101, pp. 251-269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026>
- Buyukozturk, O. (1998), “*Imaging of concrete structures*”, NDT&E International, V.31, No. 4, pp. 233–243. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00012-7)
- Chang, P., Flatau, A., Liu, S. (2003), “*Review paper: health monitoring of civil infrastructure*”, Structural Health Monitoring, V.2, No. 3, pp. 257–267.
- Cheng, Ch.; Cheng, T.; Chiang, Ch. (2008), “Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves”. Automation in Construction, V.18, No. 1, pp. 87-92.
- Clark, M., McCann, D., Forde, M. (2003), “*Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*”. NDT&E International, V.36, No. 4, pp. 265-275. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00060-9)
- Dabous, S., Yaghi, S., Alkass, S., Moselhi, O. (2017), “Concrete bridge deck condition assessment using IR Thermography and Ground Penetrating Radar technologies”, Automation in Construction. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.04.006>
- Davis, A. (2003), “*The nondestructive impulse response test in North America:1985–2001*”, NDT&E International, V.36, No. 4, pp. 185–193. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00065-8)
- Ellenberg, A., Kontos, A., Moon, F., Bartoli, I. (2016). “Bridge Deck delamination identification from unmanned aerial vehicle infrared imagery”, Automation in Construction, V.72, No. 2, pp. 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.024>
- Estes, A., Frangopol, D. (2003), “*Updating bridge reliability based on bridge management systems visual inspection results*”, J. Bridge Eng., V.8, No. 6, pp. 374–382.
- Farrag, S., Yehia, S., Qaddoumi, N. (2016), “*Investigation of Mix-Variation Effect on Defect-Detection Ability Using Infrared Thermography as a Nondestructive Evaluation Technique*”, J. Bridge Eng., V.21, No. 3, pp. 1-15. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000779](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000779)

- FLIR-Forward Looking Infrared. (2013), “*User’s manual FLIR Exx Series*” (Wilsonville, United States: FLIR), p. 100.
- Fox, M., Goodhew, S., Wilde, P. (2016), “*Building defect detection: External versus internal thermography*”, Building and Environment, V.105, pp. 317-331.
- GPO-Government Publishing Office. (2015), “*Electronic Code of Federal Regulations: Subpart C, Title 23, 650.311*” (Washington D.C., United States: GPO)
- Gucunski, N., Imani, A., Romero, F., Nazarian, S., Yuan, D., Wiggenhauser, h., Shokouhi, P., Taffe, A., Kutrubes, D. (2013), “*Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration*” (Washington D.C., United States: SHRP 2 Research Reports, Transportation Research Board of the National Academies), p. 85. <https://doi.org/10.17226/22771>
- Gucunski, N., Kee, S., La, H., Basily, B., Maher, A. (2015), “*Delamination and concrete quality assessment of concrete bridge decks using a fully autonomous RABIT platform*”, Structural Monitoring and Maintenance, V.2, No. 1, pp.19-34. <http://dx.doi.org/10.12989/smm.2015.2.1.019>
- Herrmann A. (2013), “*ASCE 2013 Report card for America’s Infrastructure*” (Washington D.C., United States: ASCE), p. 74. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784478837>
- Hiasa, S. (2016), “*Investigation of infrared thermography for subsurface damage detection of concrete structures*”. Tesis (Doctorado), University of Central Florida, p. 224.
- Hiasa, S., Birgul, R., Catbas, F. (2016), “Infrared thermography for civil structural assessment: demonstrations with laboratory and field studies”, J Civil Struct Health Monit, V.6, No. 3, pp. 619-636. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-016-0180-9>
- Hiasa, S., Birgul, R., Catbas, N. (2017a), “Investigation of effective utilization of infrared thermography (IRT) through advanced finite element modeling”, Construction and Building Materials, V.150, pp. 295-309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.175>
- Hiasa, S., Birgul, R., Catbas, N. (2017b), “A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges”, Computers & Structures, V.190, pp. 205-218. <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 vehicles. Structural Monitoring and Maintenance*”, V.3, No. 3, pp. 277-296. <https://doi.org/10.12989/smm.2016.3.3.277>
- Holt, F., Manning, D. (1980), “Detecting Delamination in Concrete Bridge Decks”, Concrete International, V.2, No. 11, pp. 34-41.
- Islam, A., Li, F., Hamid, H., Jaroo, A. (2014), “*Bridge Condition Assessment and Load Rating using Dynamic Response*” (Youngstown, United States: ODOT), p. 128.0
- Jadin, M., Taib, S. (2012), “*Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography*”, Infrared Physics & Technology, V.55, No. 4, pp. 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.002>
- Jain, K., Bhattacharjee, B. (2011), “*Application of fuzzy concepts to the visual assessment of deteriorating reinforced concrete structures*”, Journal of Construction Engineering Management, V.138, No.3, pp. 399-408. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000430](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000430)
- 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, V.17, No. 6, pp. 928-939. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000350](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000350)
- Lahiri, B., Bagavathiappan, S., Jayakumar, T., Philip, J. (2012) “*Medical applications of infrared thermography: a review*”, Infrared Physics & Technology, V.55, No. 4, pp. 221–235. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.007>
- Maierhofer, C., Arndt, R., Rollig, M. (2007), “*Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography*”, Infrared Physics & Technology, V.49, No. 3, pp. 213–217.
- Maierhofer, C., Arndt, R., Rollig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., Hillemeier, B. (2006), “*Application of impulse thermography for non-destructive assessment of concrete structures*”,

- Cement & Concrete Composites, V.28, No. 4, pp. 393-401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.011>
- Malague, X. (2001), "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing" (New York, United States: John Wiley and Sons), p. 704. ISBN: 978-0-471-18190-3
- Maser, K., Roddis, W. (1990), "Principles of thermography and radar for bridge deck assessment", J. Transport. Eng., V.116, No. 5, pp. 583–601. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1990\)116:5\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:5(583))
- McCan, D., Forde, M. (2001), "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures", NDT & E International, V.34, No. 2, pp. 71–84. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00032-3)
- Mendes, P., Moreira, M., Pimienta, P. (2012), "Pontes de concreto armado: efeitos da corrosão e da variação do módulo de elasticidade do concreto", IBRACON de Estruturas e Materiais, V.5, No. 3, pp. 389-401. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952012000300008>
- Meola, C., Carlomagno, G., Squillace, A., Giorleo, G. (2002), "Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography", Measurement Science & Technology, V.13, No. 10, pp. 1583–1590. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/10/311>
- Meola, C. (2007), "Infrared thermography for masonry structure", Infrared Physics & Technology, V.49, No. 3, pp. 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.06.010>
- Meola, C. (2012), "Origin and theory of infrared thermography", in: C. Meola (Ed.), Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends, Bentham eBooks, pp. 3–28.
- Montanini, R. (2010), "Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of plexiglas by means of lock-in and pulsed phase infrared thermography", Infrared Physics & Technology, V.53, No. 5, pp. 363–371. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.07.002>
- O'Grady, M., Lechowska, A., Harte, A. (2016), "Infrared thermography technique as in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging", Energy and Buildings, V.135, pp. 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.039>
- 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, V.139, No. 3, pp. 305-314. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000441](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000441)
- Pines, D., Aktan, A. (2002), "Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States", Prog. Struct. Mater. Eng., V.4, No. 4, pp. 372–380.
- Pintan, N., Berenguer, R., Silva A., Lins, C., Monteiro, E. (2015), "Pathological Manifestations and the Study of Corrosion Present on Bridges of the City of Recife", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, V.20, No. 24, pp. 11893-11907.
- Poblete, A., Pascual, M. (2007), "Thermographic measurement of the effect of humidity in mortar porosity", Infrared Physics & Technology, V.49, No. 3, pp. 224–227. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.06.009>
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S., Jameel, M. (2016), "Nondestructive test methods for concrete bridges: A review", Construction and Building Materials, V.107, No. 15, pp. 58-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Sakagami, T., Kubo, S. (2002), "Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography", Infrared Physics & Technology, V.43, No. 3-5, pp. 311-316. [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00157-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00157-3)
- Scott, M., Rezaizadeh, A., Delahaza, A., Santos, C., Moore, M., Graybeal, B. (2003), "A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment", NDT&E International, V.36, No. 4, pp. 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00061-0)
- Sham, J., Lo, T., Memon, S. (2012), "Verification and application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release

- characteristics by building fabrics”, Energy Build., V.53, pp. 108–116.* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.018>
- Uemoto, T. “*Maintenance of concrete structure and application of nondestructive inspection in Japan*”, in: T. Uemoto (Ed.), Proc. Non Destructive Testing in Civil Eng., ELSEVIER, 2000, Kidlington: OX (UK), (2000) pp. 1–11.
- Vaghefi, K., Ahlborn, T., Harris, D., Brooks, C. (2015), “*Combined Imaging Technologies for Concrete Bridge Deck Condition Assessment*”. Journal of Performance of Constructed Facilities, V.29, No. 4, pp. 1-8. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000465](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000465)
- 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, V. 17, No. 6, pp. 886-895. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000303](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000303)
- Vaghefi, K., Melo e Silva, H., Harris, D., Ahlborn, R. (2011), “*Application of thermal IR imagery for concrete bridge inspection*”. In: PCI National Bridge Conference, PCI/NBC, Salt Lake City: UT (USA), pp. 1-12.
- Vemuri, S., Atadero, A. (2017), “*Case Study on Rapid Scanning Techniques for Concrete Bridge Decks with Asphalt Overlay: Ground-Penetrating Radar and Infrared Thermography*”, Pract. Period. Struct. Des. Constr., V.22, No. 2, pp. 1-8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000313](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000313)
- Venkataraman, B., Raj, B. (2003), “*Performance parameters for thermal imaging systems*”, Insight, V.45, No. 8, pp. 531-535. <https://doi.org/10.1784/insi.45.8.531.52914>
- Vilbig, R. (2013), “*Air-Coupled and ground-coupled ground penetrating radar techniques*”, Tese de Mestrado, Northeastern University - Boston, p. 60.
- Vitório, J., Barros, R. (2013), “*Análise dos danos estruturais e das condições de estabilidade de 100 pontes rodoviárias no Brasil*”, In: P. Cruz, R. Calçada, T. Mendonça (Eds), Segurança, Conservação e Reabilitação de Pontes, ASCP, Porto: Portugal, pp. 62-70.
- Washer, G. (2012), “*Advances in the use of thermographic imaging for the condition assessment of bridges. Bridge Structures*”, V.8, No. 2, pp. 81-90. <http://dx.doi.org/10.3233/BRS-2012-0041>
- Washer, G., Fenwick, R., Bolleni, N. (2009), “*Development of Hand-held Thermographic Inspection Technologies*” (Jefferson City, United States: MODOT), p. 120.
- Washer, G., Fenwick, R., Bolleni, N. (2010), “*Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete*”, Journal of Bridge Engineering, V.15, No. 4, pp. 384-390. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000117)
- Washer, G., Trial, M., Jungnitsch, A., Nelson, S. (2015), “*Field Testing of Hand-Held Infrared Thermography, Phase II*” (Columbia, United States: MODOT), p. 104.
- 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, V.101, No. 1, pp. 1016-1030. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.156>
- Yehia, S., Adudayyeh, O., Nabulsi, S., Abdelqader, I. (2007), “*Detection of common defects in concrete bridge decks using nondestructive evaluation techniques*”, Journal of Bridge Engineering, V.12, No. 2, pp. 215-225. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:2\(215\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:2(215))
- Yuanlin, L., Qingju, T., Chiwu, B., Chen, M., Pingshan, W., Jiansuo, Z. (2015), “*Pulsed infrared thermography processing and defects edge detection using FCA and ACA*”, Infrared Physics & Technology, V.72, pp. 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.07.010>
- Zhang, Z., Tsai, N., Machin, G. (2009), “*Radiometric Temperature Measurements*” (Oxford, United Kingdom: Academic Press), p. 480. ISBN: 978-0-123-75091-4
- Zhao, H., Zhou, Z., Fan, J., Li, G., Sun, G. (2017), “*Application of lock-in thermography for the inspection of disbonds in titanium alloy honeycomb sandwich structure*”, Infrared Physics & Technology, V.81, pp. 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.020>