

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

Recebido: 06/07/2017 | Aceito: 06/09/2017 | Publicado: 29/09/2017

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.

Citar como: J. H. A. Rocha, Y. V. Póvoas (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), pp. 200-214, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>

¹ Universidade de Pernambuco, Brasil.

Informação Legal

Revista ALCONPAT é uma publicação da Associação Latino-americana Controle de Qualidade, Recuperação Patologia e Construção, Internacional, A. C., Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, E-mail: alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos ao No. 04-2013-011717330300-203 uso exclusivo, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional do Direito de Autor. Responsável pela atualização mais recente deste número, ALCONPAT Unidade Computing, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e imagens publicadas sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C é proibida.

Qualquer discussão, incluindo a réplica dos autores, serão publicados na segunda edição do 2018, desde que a informação é recebida antes do encerramento da primeira edição de 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 articles and academic material related to the area was carried out. This review focuses mainly on the passive application and on both laboratory and field studies. A critical approach to the information available was used in relation to its scope was used. The test is presented as a real alternative for the detection of defects in these structures, being more effective the more superficial these anomalies. Depending on the work to be done, it is necessary to contemplate some considerations to obtain better results. And it is effective in combination with other tests.

Keywords: infrared thermography; bridge inspection; concrete pathologies.

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

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. Y es eficaz en combinación con otros ensayos.

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

1. INTRODUÇÃO

A inspeção e manutenção de estruturas de concreto armado são atividades importantes para a preservação da vida útil, a garantia da segurança e a funcionalidade para os usuários (Bagavathiappan et al., 2013). No entanto, a medida que as estruturas envelhecem, estas atividades são cada vez mais complexas de serem realizadas; contudo, devem a qualquer momento determinar e controlar a integridade estrutural, além de avaliar a natureza do dano (Chang; Flatau; Liu, 2003; Rehman et al., 2016).

As pontes são estruturas que se deterioram rapidamente, especialmente as suas lajes, porque estão diretamente expostas ao tráfego e ao meio ambiente (Gucunski et al., 2015). A degradação do concreto, a corrosão de aço, o enfraquecimento das conexões, entre outros problemas, são causas de preocupação permanente na manutenção de pontes. Uma correta inspeção e avaliação das pontes e suas partes é necessária para evitar uma deterioração da integridade estrutural e do serviço com o tempo (Islam et al., 2014)

Nos Estados Unidos as pontes são inspecionadas duas vezes por ano (GPO, 2015) e 40% das pontes avaliadas são classificadas como estruturalmente deficientes e não estão em condições de funcionalidade (Pines e Aktan, 2002). Estas estruturas são projetadas e construídas para operar por

pelo menos 50 anos, mas a média de vida de uma ponte nos Estados Unidos é cerca de 42 anos, ao contrário das especificações técnicas (Herrmann, 2013).

No Brasil a situação é semelhante. De acordo com a NBR 9452 (ABNT, 2016), as pontes devem ser inspecionadas a cada ano, mas apenas com uma inspeção rotineira. As inspeções mais detalhadas devem ocorrer entre 5 a 8 anos, dependendo do caso. As pesquisas na área (Mendes; Moreira; Pimentá, 2012; Pintan et al., 2015; Vítório e Barros, 2012) mostram que mais do que um terço das pontes estudadas possuem características deficientes, associadas em muitos casos à falta de manutenção adequada ou oportuna.

Embora a inspeção visual seja o método mais amplamente utilizado na inspeção de estruturas de concreto e o primeiro passo na avaliação de estruturas (Chang; Flatau; Liu, 2003; Estes e Frangopol, 2003; ACI, 2013; Alani; Aboutalebi; Killic, 2014; Rehman et al., 2016), o seu âmbito é limitado apenas na análise qualitativa de forma subjetiva, porque depende do critério do inspetor (Jain e Bhattacharjee, 2011), além de não ser capaz de detectar problemas internos da estrutura, a menos que seja uma deterioração avançada que apresente sinais externos, sendo este um caso indesejado e que deve ser evitado (Vilbig, 2014).

Os ensaios não destrutivos fornecem informações relevantes do estado da estrutura (McCann e Forde, 2001), o que permite avaliar rapidamente e eficazmente os danos (Chang; Flatau; Liu, 2003) e dessa forma evitar o colapso prematuro e imprevisível (Rehman et al., 2016). Vários pesquisadores têm demonstrado a aplicação destes métodos para a inspeção e a avaliação de estruturas, fornecendo orientações dos seus usos (Clark; McCann; Forde, 2003; Scott et al., 2003; Meola 2007). McCann e Forde (2001) apresentam uma variedade de métodos não destrutivos adequados para obras de construção civil, e, especificamente Rehman et al. (2016), apresenta em detalhe os ensaios não destrutivos para a inspeção de pontes.

A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo tem sido utilizada para a inspeção de estruturas civis com resultados satisfatórios (Meola, 2007; Fox; Goodhew; Wilde, 2016; Hiasa; Birgul; Catbas, 2016), e a sua aplicação específica na inspeção de pontes está cada vez mais consolidada (Watase et al., 2015; Ellenberg et al., 2016; Dabous et al., 2017; Hiasa; Birgul; Catbas, 2017a). No entanto apresenta algumas limitações quanto: à profundidade de detecção de defeitos, a influência das condições ambientais, o horário de coleta de dados, entre outros. Nesse sentido, o objetivo deste artigo é analisar os alcances da termografia infravermelha na inspeção de pontes de concreto armado, descrevendo os conceitos básicos de operação da termografia infravermelha, além das metodologias e técnicas de análise da informação, visando fornecer uma melhor avaliação de diagnóstico de patologias em pontes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Revisão histórica e princípio de funcionamento

Todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto (0 K) emitem radiação na faixa infravermelha do espectro eletromagnético. De acordo com o comprimento de onda, a radiação infravermelha está na faixa de 0,75 a 1000 μm (micrometro), localizado entre a faixa visível e micro-ondas (Figura 1) (Clark; McCann; Forde, 2003; Meola, 2012; Bagavathiappan et al., 2013). A radiação infravermelha foi descoberta por William Herschel em 1800, no entanto, a primeira imagem térmica foi feita por seu filho, John Herschel em 1840 (FLIR, 2013). Apesar deste progresso, a termografia infravermelha não foi usada até as últimas décadas pela falta do desenvolvimento de equipamentos e conhecimentos técnicos (Bagavathiappan et al., 2013).

Na termografia infravermelha, a radiação infravermelha emitida por um objeto é detectada de um modo sem contato por um detector infravermelho da câmara usando a equação de Stefan-Boltzmann (1) e desta forma a temperatura do objeto é obtida (Clark; McCann; Forde, 2003; Washer, 2012; ACI, 2013; Watase et al., 2015).

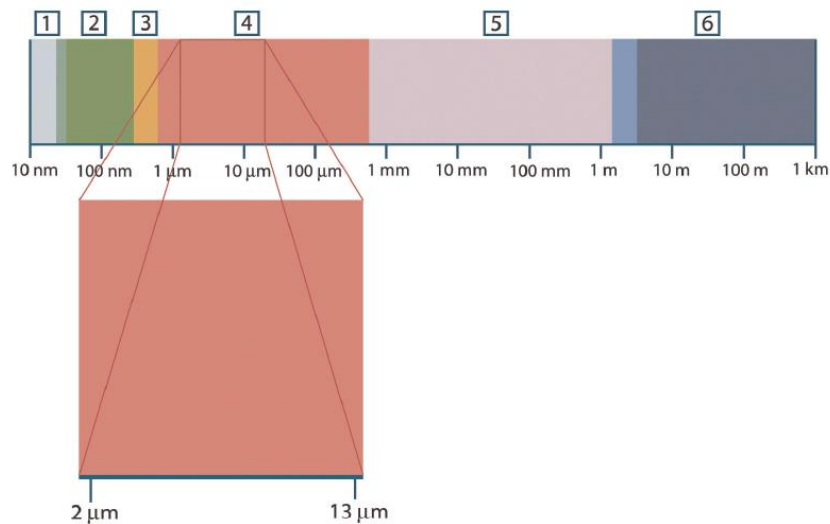


Figura 1. Espectro eletromagnético. 1: Raio-X; 2: Ultravioleta; 3: Visível; 4: Infravermelho; 5: Microondas; 6: Ondas de rádio (FLIR, 2013)

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

Onde E é a radiação emitida pelo objeto (W/m^2), q é o grau de emissão de energia (W), A é a área da superfície emissora (m^2), T é a temperatura absoluta (K), σ é a constante de Stefan-Boltzmann de valor $5.676 \times 10^{-8} \text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$, e ε é a emissividade da superfície emissora. A emissividade é a medida da eficiência de uma superfície para agir como um emissor (Clark; McCann; Forde, 2003). Um corpo negro perfeito tem uma emissividade de valor igual a um, considerado como um emissor perfeito, no entanto, para outras superfícies o valor é inferior a um. No caso do concreto tem-se uma emissividade relativamente elevada, entre 0,9-1 (Washer; Fenwick; Bolleni, 2010).

2.2 Metodologia e análise

A aplicação da termografia infravermelha pode ser dividida em duas categorias: ativa e passiva, dependendo dos recursos empregados de calor (Kee et al., 2012; Rehman et al., 2016). A termografia passiva não requer fontes de estimulação externa (Oh et al., 2013), usa a energia solar e a temperatura ambiente como principais recursos de aquecimento, e é a técnica utilizada para inspeção de pontes (Kee et al., 2012; Vaghefi et al., 2012; Alfredo-Cruz et al., 2015), bem como para outras estruturas e outros campos (Buyukozturk, 1998; Lahiri et al., 2012; Barreira; Almeida; Delgado, 2016; Fox; Goodhew; Wilde, 2016; O’Grady; Lechowska; Harte, 2016). Em contraste, a termografia ativa requer fontes externas de estimulação de calor (Kee et al., 2012; Rehman et al., 2016), pode até ser sub-dividida de acordo com a natureza da estimulação como: Pulsed, Lock-in, Pulsed-Phase, entre outros (Maldague, 2001). A aplicação das técnicas de termografia ativa estão relacionadas com a detecção de defeitos em metais, monitoramento de processos industriais, entre outros (Meola et al., 2002; Montanini, 2010; Yuanlin et al., 2015; Zhao et al., 2017).

A termografia infravermelha tem dois tipos de medições e análises. A primeira é a quantitativa, a qual consiste em obter a temperatura do objeto com precisão; a segunda é a qualitativa que é a obtenção de valores relativos de pontos quentes em relação a outras partes do mesmo objeto, utilizando-as como referência. Em uma análise qualitativa, algumas aplicações não exigem a determinação da temperatura exata, apenas temperaturas relativas, recolhendo dados para serem interpretados de uma forma mais rápida; no entanto, a análise pode ter falhas de precisão. Em uma análise quantitativa, o procedimento é mais rigoroso e serve para aplicações específicas (Jadin e Taib, 2012).

2.3 Vantagens e limitações

A termografia infravermelha é apresentada como uma técnica: rápida, não-invasiva, sem contato, que permite o registo das variações dinâmicas em tempo real, que pode ser aplicada a grandes distâncias, que pode analisar e inspecionar grandes áreas em pequenos intervalos de tempo, de resultados fáceis e de rápida interpretação (Yehia et al., 2007; Washer; Fenwick; Bolleni, 2010; Sham; Lo; Memon, 2012; Watase et al., 2015; Hiasa; Birgul; Catbas, 2016; Rehman et al., 2016); além de ter uma instrumentação simples, na maior parte dos casos, só é necessária uma câmara termográfica, o apoio da câmara e uma saída de vídeo para observar imagens térmicas (Bagavathiappan et al., 2013).

Apesar das muitas vantagens oferecidas pelo método na inspeção, o equipamento pode ser caro, não é sensível para detectar a profundidade dos defeitos e anomalias no concreto, e o ensaio é altamente influenciado pelas condições ambientais, tais como: vento, radiação solar, humidade e emissividade da superfície (Manning; Holt, 1980; Yehia et al., 2007; Washer; Fenwick; Bolleni, 2009; ACI, 2013)

2.4 Câmeras termográficas

As câmeras térmicas têm sofrido muitas mudanças nas últimas décadas; as primeiras tiveram baixa resolução espacial, altos níveis de ruído, pouca faixa dinâmica e armazenamento de dados limitado (Zhang; Tsai; Machin, 2009). Cada dia as câmeras são mais leves e portáteis, com novos tipos de detectores infravermelhos com melhor resolução e precisão, cobrindo mais e mais aplicações (Bagavathiappan et al., 2013).

No momento da escolha de uma câmara termográfica deve-se ter em conta alguns parâmetros de desempenho, tais como: a faixa espectral, a resolução espacial, a resolução de temperatura, a faixa de temperatura e a frequência de fotogramas. No entanto, outros fatores podem ser considerados como: potência, peso, tamanho, capacidade de processamento de imagem, calibração, capacidade de armazenamento, custo, serviço, entre outros; dependendo do tipo de trabalho a realizar (Venkataraman e Raj, 2003).

A faixa espectral é a porção da região infravermelha no qual a câmara é capaz de operar. Sabe-se que à medida que a temperatura de um objeto aumenta, a radiação térmica emite comprimentos de onda curtos (Bagavathiappan et al., 2013); no entanto, os objetos que se encontram na temperatura ambiente emitem comprimentos de onda longos (7.5-14 μm); por conseguinte, neste caso seria preferível câmaras com este sistema de comprimento de onda porque as medições não seriam afetadas pela radiação solar, que geralmente estão em faixas de comprimento curto. Por outro lado, as câmeras com sistemas de ondas curtas (2-5 μm) podem ter um melhor desempenho em dias nublados ou à noite, uma vez que a radiação solar não poderia influenciar os resultados por ter a mesma faixa de comprimento de onda (Jaldin e Taib, 2008).

A qualidade da imagem depende de quão grande é a resolução espacial. A resolução espacial é a capacidade da câmara termográfica de distinguir dois objetos no campo visual. Depende diretamente do sistema de lentes, do tamanho do detector e da distância entre o objeto e a câmara. Quanto maior for essa distância, menor será a resolução espacial (Venkataraman e Raj, 2003).

A resolução da temperatura é o mínimo diferencial térmico que pode ser detectado pela câmara termográfica. Depende de muitos parâmetros como: a temperatura do objeto e do meio ambiente, a distância da câmara ao objeto, os filtros, entre outros (Venkataraman e Raj, 2003).

A faixa de temperatura refere-se aos valores máximo e mínimo que a câmara é capaz de medir. Estes valores podem variar de acordo com as especificações da câmara. A frequência de termogramas é a quantidade de quadros que se consegue adquirir por segundo que é importante no caso de monitorar objetos em movimento ou eventos dinâmicos (Venkataraman e Raj, 2003).

3. INSPEÇÃO DE PONTES

O conceito da termografia infravermelha aplicado para a inspeção é baseado nos vazios, defeitos ou anomalias do concreto que afetam as propriedades térmicas de transferência de calor da estrutura. Conforme a temperatura sobe durante o dia, as áreas onde estão os defeitos interrompem a transferência de calor no interior do concreto, aquecendo rapidamente e isto é porque os defeitos são encheidos com ar ou água, que têm uma condutibilidade térmica diferente do concreto. Pelo contrário, à noite, quando as temperaturas caem, as áreas onde estão os defeitos são resfriadas mais rápido do que áreas sem problemas (Figura 2). As câmeras podem detectar estes defeitos de medição da radiação emitida a partir da superfície do concreto pela equação de Stefan-Boltzmann (1) (Maser e 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 e Atadero, 2017).

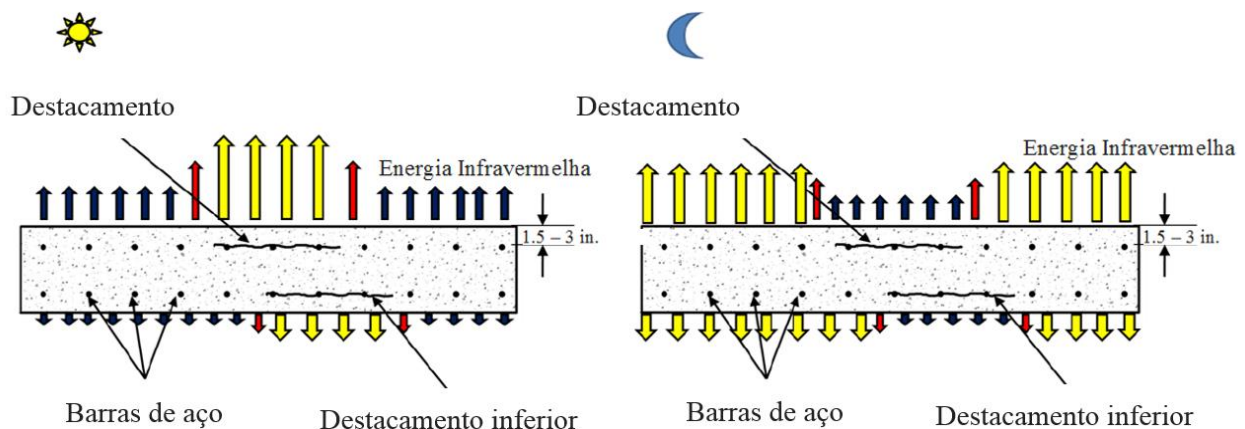


Figura 2. Energia infravermelha emitida a partir do concreto em condições de dia e de noite. (Washer et al., 2015)

A radiação, a condução e a convecção são os principais mecanismos de transferência de calor que afetam o fluxo de calor através do concreto. Embora a energia radiante seja o parâmetro que pode ser medido por uma câmera termográfica, a condutividade térmica dentro do concreto e a convecção de calor em torno do concreto influencia na tomada de termogramas (Vaghefi et al., 2011).

A detecção de defeitos ou destacamentos no concreto é realizada através do gradiente ou contraste térmico (ΔT), definido pela equação (2) (Washer et al., 2015)

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

Onde T_D é a temperatura que está acima da superfície do defeito, e T_C é a temperatura do concreto intacto.

A aplicação da termografia infravermelha para a inspeção de edifícios e de seus componentes é amplamente regulada (ASTM, 2013a; ASTM, 2015a; ASTM, 2015b); e especificamente tem-se a norma D4788-03 (ASTM, 2013b) para a inspeção de pontes de concreto armado.

A aplicação em estruturas de concreto está focada principalmente na detecção de: defeitos superficiais, porosidade, fissuras, avaliação de danos (McCann e Forde, 2001; Maierhofer; Arndt; Röllig, 2007; Poblete e Pascual, 2007; Arndt, 2010; ACI, 2013; Bagathiappan et al., 2013) e, particularmente no caso de pontes de concreto armado, em detectar destacamentos e vazios (Figura 3), através de uma maneira visual nos termogramas ou por gradientes térmicos calculados com a

equação (2) (Clark; McCann; Forde, 2003; Washer, Fenwick; Bolleni, 2010; ASTM, 2013b; Gucunksi et al., 2013).

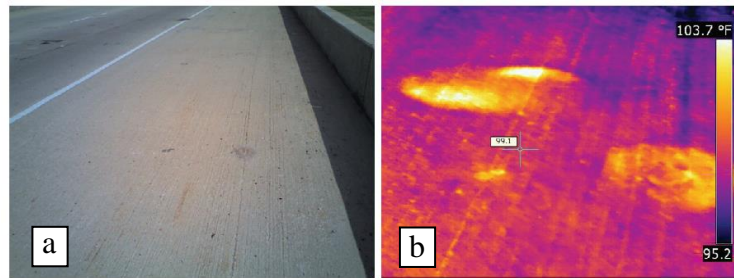


Figura 3. Detecção de destacamentos: a) Fotografia digital e b) Termograma. (Washer; Fenwick; Bolleni, 2009)

Os defeitos que tenham maior gradiente térmico são mais detectáveis mesmo a grandes profundidades (Washer et al., 2015). Neste sentido, a norma D4788-03 (ASTM, 2013b) indica que este gradiente deve de no mínimo $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para ter boa precisão na detecção. No entanto, Clark et al. (2003) detectou defeitos e destacamentos na estrutura interna de pontes de concreto armado e de alvenaria, localizadas sob a baixa temperatura ambiente, e indicou que estes defeitos podem ser detectados quando o gradiente for de $0,2\text{-}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, aproximadamente. Washer, Fenwick e Bolleni (2010) afirmam que a termografia infravermelha é apropriada na inspeção de pontes nas partes expostas ao sol, pois gera grandes gradientes, no entanto, em casos extremos, o sol pode limitar a técnica gerando falsas detecções (Washer et al., 2015). Em relação às partes não expostas à luz solar direta, Figura 4a, Washer (2012) conclui que os destacamentos e defeitos podem ser detectados quando as variações de temperatura durante o dia e à noite forem suficientemente grandes para gerar gradientes, Figura 4b, notando que durante os períodos de esfriamento e aquecimento do dia os gradientes térmicos são pequenos, resultando ineficaz a inspeção durante estes períodos. Farrag, Yehia e Qaddoumi (2016) utilizou um gradiente mínimo de $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a detecção de destacamentos em adição à detecção visual nos termogramas.

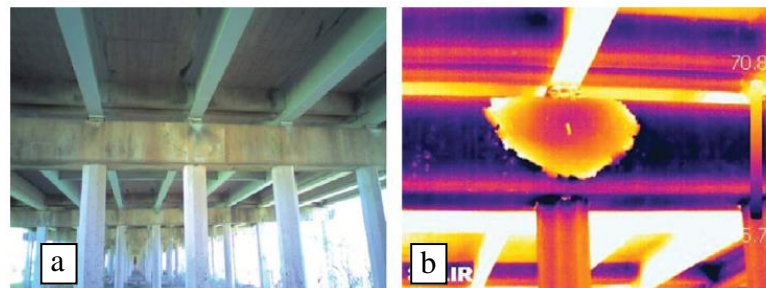


Figura 4. Aplicação na infraestrutura de pontes: a) Fotografia digital e b) Termograma (Washer, 2012)

Os fatores processuais referem-se às condições experimentais e ao conhecimento anterior do objeto de estudo; podem ser minimizados usando termografistas qualificados para a obtenção de dados e para a sua respectiva correção ou interpretação (Buyukozturk, 1998; Uemoto, 2000; Vemuri e Atadero, 2017).

As condições ambientais referem-se a sua influência direta nas medições (Washer et al., 2015). A termografia infravermelha é uma técnica muito sensível em relação às condições ambientais (Yehia et al., 2007; Oh et al., 2013). A exposição ao sol é considerada como a principal força para gerar gradientes térmicos, pois afeta os valores de temperatura medidos, gerando energia térmica na superfície do concreto. Do mesmo modo, o aumento da temperatura ambiente produz um aumento

da temperatura dos objetos, ao contrário de eventos como: umidade, chuva ou neve que reduzem a temperatura de objetos; no entanto, maiores variações de temperatura durante o dia podem gerar maiores gradientes térmicos (Washer; Fenwick; Bolleni, 2010). O vento também pode interferir na temperatura dos objetos a serem estudados, em maior grau quando o vento é forte, pelos efeitos de corte de temperatura gerados na superfície (Davis, 2003).

Em seguida, descreve-se as principais capacidades e limitações da técnica na inspeção de pontes de concreto armado em relação: à detecção da profundidade e tamanho de destacamentos, ao horário ideal de coleção de dados, à influência da qualidade de concreto, a velocidade de obtenção de dados e na combinação com outros ensaios.

3.1 Profundidade, tamanho de destacamentos, defeitos e horário de inspeção

A detecção da profundidade e do tamanho de destacamentos tem sido um ponto bem investigado. Muitos autores usam defeitos artificiais para serem captados com a câmera infravermelha e desta forma avaliar o alcance da técnica. Da mesma forma existem muitas recomendações do horário ideal para a obtenção de dados (Hiasa, 2016). Na Tabela 1 apresenta-se um resumo dos principais trabalhos na detecção de destacamentos em relação ao tamanho, à profundidade e ao horário.

Na revisão da literatura (Tabela 1) observa-se que, quanto maior e mais superficial a área do defeito, a detecção é mais fácil. Neste sentido, Farrag, Yehia e Qaddoumi (2016) concluíram que se a relação R/d (R : dimensão curta do defeito e d : profundidade do defeito desde a superfície) é maior do que 1, os defeitos são encontrados; se esta relação R/d for igual a 0,45, são detectáveis até uma profundidade de 10 cm.

Em trabalhos mais recentes com relação à profundidade de detecção, Hiasa, Birgul e Catbas (2017b) apresentam uma metodologia de processamento dos dados através de modelagem numérica para o uma melhor análise e posterior avaliação, onde os resultados para os defeitos a 1.27 e 2.54 cm de profundidade foram detectados com maior precisão que uma simples análise de cores no termograma.

O horário de inspeção é um ponto controverso, uma vez que as recomendações dos autores são contraditórias em alguns casos, mas depende das condições ambientais do local do objeto em estudo; mesmo assim alguns autores (Uemoto, 2000; Watase et al., 2015; Hiasa et al., 2016) recomendam a inspeção de pontes durante a noite para eliminar os efeitos da radiação solar, e ter uma melhor visão entre o defeito e as regiões intactas, evitando falsas detecções. No entanto, Hiasa, Birgul e Catbas (2017a) mostram o potencial dos modelos de elementos finitos com termografia infravermelha para a inspeção de pontes, fornecendo a estimativa dos parâmetros de detecção como profundidade e tamanho de defeitos e, até mesmo, horários ideais de inspeção.

3.2 Qualidade do concreto

Farrag, Yehia e Qaddoumi (2016) utilizaram várias misturas de concreto para observar a sua influência na detecção de defeitos, demonstrando que o concreto de alta resistência e, portanto, com uma maior densidade e maior condutibilidade térmica é melhor para a detecção de defeitos utilizando a técnica.

De acordo com a literatura, não foram claramente estabelecidos limites de detecção de destacamentos em relação à profundidade e à qualidade do concreto, relação a/c e resistência à compressão. Yehia et al. (2007) encontrou vazios e defeitos a uma profundidade de 4 cm em um concreto de resistência à compressão de 28 MPa, enquanto Kee et al. (2012) encontraram destacamentos a 5 cm em um concreto da mesma resistência. Maierhofer et al. (2006) encontraram vazios a uma profundidade de 6 cm em um concreto de 48 MPa, utilizando termografia infravermelha ativa. Alfredo-Cruz (2015), em um concreto de 38 MPa e uma relação a/c de 0.35, detectaram destacamentos até uma profundidade de 5 cm, sendo os defeitos a 7.5 cm os menos visíveis. Farrag, Yehia e Qaddoumi (2016) encontraram destacamentos e vazios a 10 cm de profundidade com um concreto de resistência à compressão de 50 MPa.

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

Tabela 1. Detecção de destacamentos em relação ao tamanho, à profundidade e ao horário

Autores	Profundidade de destacamento (cm)	Área do destacamento (cm²)	Detecção	Horário de inspeção recomendado
Sakagami e Kubo (2002)	2 - 3 - 5	10x10	Sim	Termografia ativa
	10	10x10	Não	
Maierhofer et al. (2006)	2 - 4 - 6 - 8	20x20	Sim	Termografia ativa
	2 - 4 - 6 - 8	10x10	Sim	
Meola (2007)	1.5 a 7	12.5 a 78.5	Sim	Termografia ativa
Abdel-Qader et al. (2007)	2.54 a 7	19.35 a 103	Sim	Termografia ativa
	8.9 a 10.16	14.5 a 103	Não	
Yehia et al. (2007)	1.9 - 2.5 - 5.1	3.8x3.8 a 10.3x10.2	Sim	10 h às 15 h
	5.6 - 10.1	3.8x3.8 a 10.3x10.2	Não	Nenhuma hora do dia
Cheng, Cheng e Chiang (2008)	0.5 - 1 - 1.5 - 2 - 3	10x10	Sim	Termografia ativa
		5x5	Sim	
Washer, Fenwick e Bolleni (2009)	5.1	30x30	Sim	5 a 7 horas*
	7.6	30x30	Sim	7 a 9 horas*
Washer, Fenwick e Bolleni (2010)	2.5	30x30	Sim	5 horas e 40 minutos*
	12.7	30x30	Sim	Mais de 9 horas*
Washer (2012)	2.5	30x30	Não	1 hora*
	5.1	30x30	Não	1 hora e 30 minutos*
	7.6	30x30	Não	2 horas*
Kee et al. (2012)	6.35	30.5x30.5	Sim	45 Minutos
		61x30.5	Sim	3 horas e 45 minutos*
		61x61	Sim	7 horas e 45 minutos*
Gucunski et al. (2013)	6.35	30.5x30.5 e 61x30.5 e 61x61	Sim	40 minutos*
			Não	Meio dia
Vaguefi et al. (2015)	5.1 - 7.6	Destacamentos reais	Sim	Meio dia
Watase et al. (2015)	1-2-3	30x30	Sim	Meio dia
		30x30	Sim	Meia noite
Alfredo-Cruz et al. (2015)	2.5 - 5.0 - 7.5	15x15	Sim	8 h às 11 h
Hiasa et al. (2016)	1.27 - 2.54 - 5.08	10.2x10.2	Sim	Período noturno
	7.62	10.2x10.2	Não	Nenhuma hora do dia

*Após o amanhecer

3.3 Velocidade de coleta de dados

Hiasa et al. (2016) realizou a comparação de três câmeras, e o efeito da velocidade na tomada de termogramas. A realização dos experimentos foi para velocidades de 0 km/h e 48 km/h, concluindo que a câmera de maior tecnologia tem melhores resultados do que aqueles com tecnologia inferior, capturando não apenas termogramas de forma estática, mas também em movimento. Além disso, os resultados revelam que a câmera de 640x480 pixels é mais eficiente em comparação àquelas de 320x240 pixels, porque permite analisar maiores áreas em pouco tempo com boa precisão.

3.4 Combinação com outros ensaios não destrutivos

A termografia infravermelha tem sido extensivamente usada em combinação com outros ensaios não destrutivos a fim de confirmar ou complementar informação, para a obtenção de uma análise mais completa da qualidade da estrutura. Yehia et al. (2007) comparou os resultados obtidos com diferentes técnicas de avaliação não destrutiva utilizadas: termografia infravermelha, IE (Impact Echo) e GPR (Ground Penetrating Radar) usados na inspeção e avaliação de pontes. Concluiu-se que cada técnica atende objetivos específicos e juntas fornecem mais informações sobre o estado da estrutura.

Aggelis et al. (2010) estudaram a caracterização de fissuras subsuperficiais no concreto. Utilizou a termografia infravermelha para detectar a sua posição, subseqüentemente, usou o ensaio de ultra-som para um estudo mais detalhado da profundidade.

Kee et al. (2012) realizaram uma fusão entre as técnicas não destrutivas de IE e termografia infravermelha, demonstrando que a combinação dos dados obtidos permite uma detecção coerente, prática e sensível dos defeitos. Oh et al. (2013) fizeram uma comparação destes mesmos métodos com a técnica da cadeia de arrastre, sendo os resultados dos três ensaios comparáveis; no entanto, a cadeia de arraste se apresentou como menos preciso e confiável para a detecção de destacamentos em pontes, apesar de ser o mais econômico, é tecnologicamente limitado e subjetivo, pois depende da experiência do operador.

Vemuri e Atadero (2017) e Dabous et al. (2017) consideram que a combinação de termografia infravermelha como o GPR tem muitas vantagens para a inspeção de pontes, complementando-se mutuamente, porque podem detectar corrosão e fissuras em estágios iniciais tanto para defeitos quanto para sua quantificação; mesmo assim, Vemuri e Atadero (2017) verificaram que a detecção é possível quando existe uma camada de asfalto sobre a laje da ponte.

Alfredo-Cruz et al. (2015) fizeram o estudo de ensaios não destrutivos: Ultra-som, termografia infravermelha e esclerometria para avaliar elementos de pontes. Concluíram que a combinação destas técnicas apresenta resultados mais completos como: a avaliação da uniformidade e qualidade da matriz de concreto, a detecção de destacamentos e a estimativa da resistência à compressão do concreto.

Ellenberg et al. (2016) demonstra a capacidade de usar UAV (Unmanned Aerial Vehicle) equipado com câmera termográfica para a identificação de destacamentos na inspeção de pontes, como é mostrado na Figura 5.

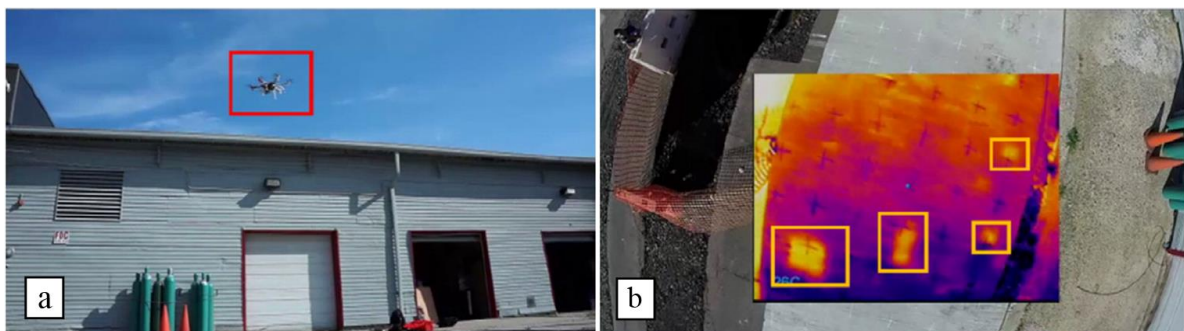


Figura 5. a) UAV sobre a localização dos destacamentos, e b) Destacamentos identificados em tempo real desde o UAV (Ellenberg et al., 2016)

Watase et al. (2015) acreditam que as tecnologias complementares à termografia infravermelha, tais como: GPR, ultra-som e outros usados no concreto, podem se tornar úteis na análise e na caracterização dos problemas no concreto, o que iria melhorar as decisões sobre a avaliação e manutenção destas estruturas. Vaghefi et al. (2015) apresentaram os resultados da termografia infravermelha com 3DOBS (Three-Dimensional 3D Optical Bridge Evaluation System), um sistema com base nos princípios da fotogrametria, capaz de quantificar as áreas destacadas e

determinar a sua percentagem em relação à área da laje da ponte, sendo esta combinação um método rápido e fácil de localizar e quantificar áreas deficientes.

Pode-se observar que a combinação da técnica com outros ensaios é geralmente realizada na inspeção de pontes, apresentando resultados satisfatórios sobre o estado destas estruturas.

4. CONCLUSÕES

No presente artigo foram apresentadas as diferentes aplicações, metodologias, alcances e as limitações da termografia infravermelha na inspeção de pontes de concreto armado. Levando-se às conclusões que seguem.

O ensaio é uma ferramenta útil para a inspeção destas estruturas e elementos que podem ser inacessíveis, porque não requer contato direto e pode ser a distância. Os resultados são imediatos, o que pode ser importante para evitar acidentes ou situações de emergência.

Existe uma boa precisão na detecção de diferentes danos na estrutura, tais como vazios, destacamentos e descolamentos, com algumas limitações quanto à profundidade e tamanho destes defeitos. As investigações mostram um avanço maior na detecção de anomalias com a melhora da tecnologia das câmeras, no entanto, o horário ideal de inspeção ainda é uma limitação, devido à dependência do ensaio com as condições ambientais, que variam de acordo com o local do ensaio. No entanto, o desenvolvimento contínuo de ferramentas e tecnologias cada vez automatizam o processo de inspeção e análise de dados, fornecendo maior confiabilidade nos resultados obtidos e tornando-se cada vez mais eficaz, possibilitando a correta análise de maiores áreas em menores tempos.

A combinação com outros ensaios permite maximizar as vantagens e compensar algumas limitações na inspeção e avaliação das estruturas, o que melhora a visão da condição estrutural e funcionalidade, ajudando nas decisões de manutenção e conservação.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- 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., Kontsos, 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., Wiggenger, 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*”. Tese de Doutorado, 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>
- Maldague, 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>