

Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha

Analysis of the Depth of Cracks in Concrete with Infrared Thermography

Joaquin Rocha ¹  orcid.org/0000-0002-3383-6379

Marcela Silva ¹  orcid.org/0000-0001-6590-2427

Yêda Póvoas ²  orcid.org/0000-0003-1907-415X

Eliana Monteiro ^{2,3}  orcid.org/0000-0003-0842-779X

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil,

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, Brasil.

³ Universidade Católica de Pernambuco, Brasil.

E-mail do autor principal: Joaquin Rocha jhar_pec@poli.br

Resumo

As fissuras são problemas que surgem frequentemente nas estruturas de concreto, que podem chegar a afetar sua durabilidade com redução de vida útil. No entanto, a identificação destas patologias é ainda limitada à inspeção visual, sem considerar outras tecnologias. O objetivo deste estudo consiste em verificar a aplicabilidade da termografia infravermelha para a detecção e análise de fissuras verticais de diferentes profundidades (5, 10 e 15) cm. Para tanto, foram moldados três corpos de prova de dimensões (50x20x20) cm, com fissuras criadas artificialmente utilizando placas de alumínio. Os corpos de prova foram expostos à radiação solar e às condições ambientais, sendo monitoradas durante 12 horas, das 7 às 19 horas. Os resultados apontaram que as fissuras têm uma temperatura mais baixa que o concreto intacto durante o dia, e apresentam um comportamento inverso durante a noite. Além disso, observou-se que quanto mais profunda é uma fissura, mais fria se torna em relação às fissuras superficiais. A termografia infravermelha demonstra capacidade de identificar fissuras durante a maior parte do dia e também permite uma análise das suas características através do gradiente térmico, formado entre a temperatura da fissura e o concreto. No entanto, é uma técnica sensível às condições ambientais, por conseguinte, a sua aplicação é sujeita a parâmetros ambientais ideais.

Palavras-Chave: Termografia infravermelha; Fissuras; Concreto.

Abstract

Cracks are problems that often arise in concrete structures, which can affect their durability with reduced life. However, the identification of these pathologies is still limited to visual inspection,

without considering other technologies. The objective of this study is to verify the applicability of infrared thermography for the detection and analysis of vertical cracks of different depths (5, 10 and 15) cm. For this, three specimens of dimensions (50x20x20) cm were molded, with cracks artificially created using aluminum plates. The specimens were exposed to solar radiation and environmental conditions, being monitored for 12 hours, from 7 to 19 hours. The results indicated that the cracks have a lower temperature than the intact concrete during the day, and have an inverse behavior during the night. In addition, it has been observed that the deeper a crack, the colder it becomes relative to the surface cracks. Infrared thermography shows the ability to identify cracks during most of the day and also allows an analysis of its characteristics through the thermal gradient formed between the temperature of the crack and the concrete. However, it is a technique sensitive to environmental conditions, therefore its application is subject to ideal environmental parameters.

Key-words: Infrared thermography; Cracks; Concrete.

1 Introdução

A deterioração das estruturas de concreto manifesta-se como defeitos externos ou internos. As fissuras são problemas normalmente encontradas nas inspeções, na maioria dos casos se tornam visíveis, no entanto, não se tem informação de sua profundidade [1]. Uma das principais causas da ocorrência de fissuras no concreto é a corrosão do aço, que provoca pressões internas, produzindo fissuras, destacamentos, planos de fratura e eventualmente desprendimentos. Outras causas incluem o calor de hidratação, a temperatura do ambiente, a restrição geométrica, a carga de tráfego, ciclos de congelamento e descongelamento, entre outras [2].

Embora existam vários métodos não destrutivos para a detecção de defeitos em estruturas de concreto, tais como Ultra-som, GPR (Ground Penetrating Radar), Impacto-Eco (IE), entre outros, a detecção e análise de fissuras ainda é efetuada por inspeção visual [3], uma técnica subjetiva, que depende da experiência do inspetor e pode gerar interpretações equivocadas [4]. A detecção precoce de fissuras e trincas pode impedir uma deterioração acelerada e aumentar a vida útil das estruturas [5,6].

A termografia infravermelha é uma técnica de avaliação não destrutiva com base na detecção da radiação térmica emitida pela superfície de um objeto, utilizada na medição e observação da variação da temperatura da superfície de objetos ou de sistemas, para a identificação de comportamentos atípicos [7]. As principais vantagens do ensaio são a velocidade de inspeção, os resultados em tempo real - que permitem a análise de grandes áreas [8] - e a facilidade de equipamentos, uma vez que apenas são necessários uma câmera termográfica, um suporte e uma saída de vídeo para observar as imagens térmicas [9]. No entanto, o método é sensível às condições ambientais que afetam os resultados [2,10].

Neste contexto, o presente estudo propõe verificar a aplicabilidade da termografia infravermelha na avaliação de fissuras visíveis de diferentes profundidades em estruturas de concreto.

2 Termografia infravermelha

A termografia infravermelha tem sido normalmente usada para a detecção de defeitos em concreto, tais como fissuras, destacamentos e desprendimentos nas estruturas de concreto armado [2]. Para detectar estes defeitos, a câmera termográfica realiza uma leitura do segmento da radiação eletromagnética na faixa infravermelha da superfície do objeto, relacionada com o processo de transferência de calor ou variações de temperatura, uma vez que todos os objetos com uma temperatura superior a zero absoluto (0 K) emitem radiação infravermelha [11].

O processo de transferência de calor ocorre por mecanismos de radiação, condução e convecção. Embora a radiação seja medida pela câmera infravermelha, a condutividade térmica dentro do concreto e a convecção do concreto com o ar podem influenciar esta medição [12]. A radiação que alcança uma superfície é transmitida, refletida e absorvida, dependendo das características do objeto [13].

O funcionamento das câmeras infravermelhas se dá a partir da medição da radiação emitida pela superfície de um objeto, e posterior conversão em sinais elétricos, que são processados numa imagem térmica, conhecida como termograma [2,14].

A relação entre a radiação infravermelha emitida por um objeto e a temperatura do mesmo é dada pela lei de Stefan-Boltzmann (Equação 1) [9,15].

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

Onde E é a radiação emitida pelo objeto (W/m^2), T é a temperatura absoluta (K), σ é a constante de Stefan-Boltzmann de valor 5.676×10^{-8} ($W m^{-2} K^{-4}$), e ε é a emissividade da superfície emissora. A emissividade é a capacidade de emissão de energia por radiação da superfície de um corpo comparada com a emissão de um corpo negro, emissor perfeito, que tem emissividade no valor de 1 (um), ou seja, a emissividade de qualquer corpo estará entre 0 (zero) e 1 (um) [16]. O concreto tem uma emissividade relativamente elevada entre 0,9 e 1,0 [17].

3 Programa experimental

A fim de verificar a aplicabilidade da termografia na avaliação de fissuras no concreto, foram moldados três corpos de prova (CP1, CP2 e CP3) com dimensões de (50 x 20) cm, e espessura de 20 cm. Com o propósito de simular uma estrutura real, os protótipos foram submetidos à exposição solar. Para cada corpo de prova, foi inserida artificialmente uma fissura com diferentes profundidades (5, 10 e 15) cm como mostrado na Figura 1. Para tal, foram utilizadas três placas de alumínio com dimensões indicadas no Quadro 1, inseridas nos prismas de concreto e retiradas após o endurecimento do mesmo

O período do estudo foi conduzido de 9 e 10 de Junho de 2017, colocando os prismas de concreto expostos à luz solar ao longo do dia, sem interferência de sombras, com alinhamento das fissuras em direção Norte conforme mostrado na Figura 2.

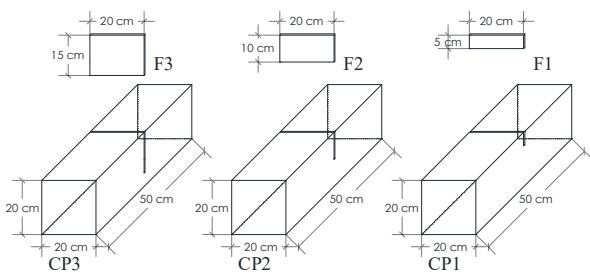


Figura 1: Detalhe dos corpos de prova.

Quadro 1: Dimensões das fissuras.

Fissura	Dimensões		
	Comprimento (cm)	Profundidade (cm)	Espessura (mm)
F1	20	5	0,95
F2	20	10	0,95
F3	20	15	0,95

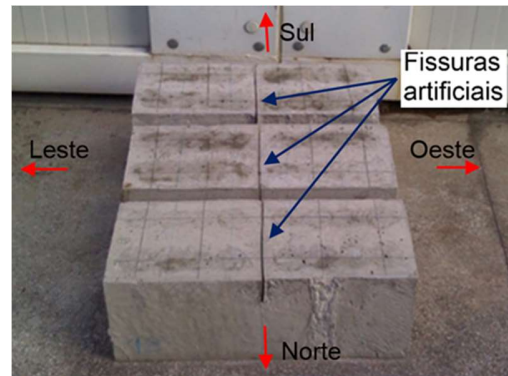


Figura 2: Localização dos corpos de prova

Os termogramas foram recolhidos a partir de um ponto fixo, esquematizado na Figura 3, no período das 7 às 19 horas, com intervalos de 60 minutos entre as leituras, de modo a observar o comportamento das fissuras ao longo do dia.

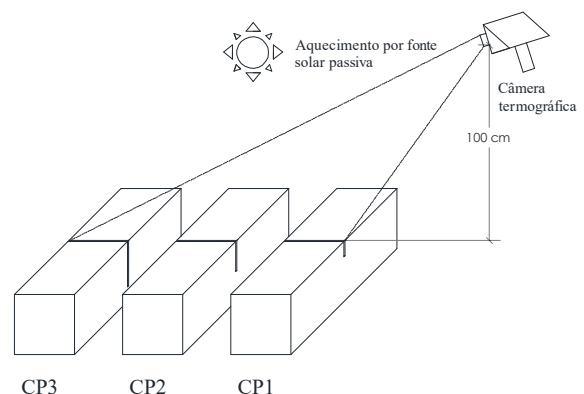


Figura 3: Posição da câmara para o ensaio.

O equipamento utilizado foi o FLIR E60. O Quadro 2 resume suas principais características. Os termogramas obtidos foram analisados no programa FLIRTools. Este software permite uma observação detalhada da temperatura de todos os pontos que compõem o termograma, além de alterar certos parâmetros para uma melhor visualização dos resultados. Durante o tempo de inspeção, também foi utilizado um termohigrômetro para medir a temperatura do ambiente e a umidade relativa.

Quadro 2: Características da câmera termográfica.

Características da câmera	FLIR E60
Resolução IR	320x240 pixels
Sensibilidade Térmica	<0.05 °C
Precisão	±2°C ou ±2% de leitura
Câmera de vídeo sem iluminação	3.1 MP
Peso	0.825 kg

Fonte: FLIR (2013).

4 Resultados e discussão

Para a análise das fissuras foi utilizada a diferença de temperatura entre o concreto íntegro e a região da fissura, definido como gradiente térmico, expresso pela Equação 2.

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

Onde, T_C é temperatura do concreto íntegro sem defeitos, e T_F é a temperatura da fissura.

Nas Figuras 4, 5, e 6, apresenta-se o comportamento da temperatura dos corpos de prova e das fissuras durante o tempo do ensaio. Observa-se nos três casos que a temperatura do concreto íntegro é maior do que a temperatura da fissura durante a maior parte do dia, no entanto, este comportamento é invertido à tarde e à noite, onde a temperatura da fissura é maior do que a do concreto. Também pode-se perceber que a temperatura da fissura se torna mais fria à medida que a profundidade da mesma aumenta.

Na Figura 7 são apresentados os gradientes térmicos para os três corpos de prova em função das horas do dia. Pode-se observar que quanto maior a profundidade da fissura, maior o gradiente térmico. Durante as primeiras horas da manhã o gradiente é praticamente zero, não sendo visíveis as fissuras neste período. No entanto, entre as 10 e 14 horas, o gradiente apresenta valores máximos, tendo uma visão completa das fissuras. Posteriormente, observa-se que o gradiente térmico tem uma inversão de positivo para negativo, sendo a detecção de defeitos ineficaz neste período, compreendido entre as 15 e 17 horas. Note-se que a fissura 1 é a primeira a passar pelo zero, aproximadamente às 15 horas; a fissura 2, uma hora depois; e a fissura 3, às 16:30 horas. Durante a noite, a partir das 18 horas, um gradiente negativo pode ser exibido, onde as fissuras são visualizadas em menor grau do que os gradientes do dia.

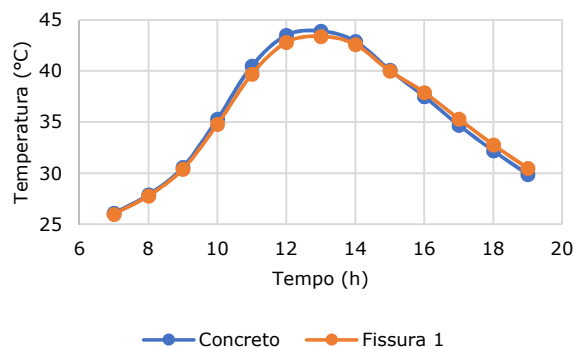


Figura 4: Temperatura do Corpo de Prova 1.

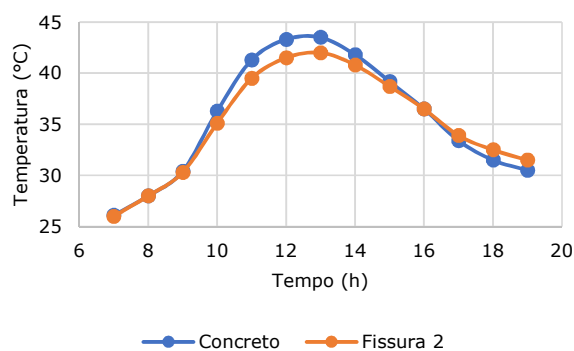


Figura 5: Temperatura do Corpo de Prova 2.

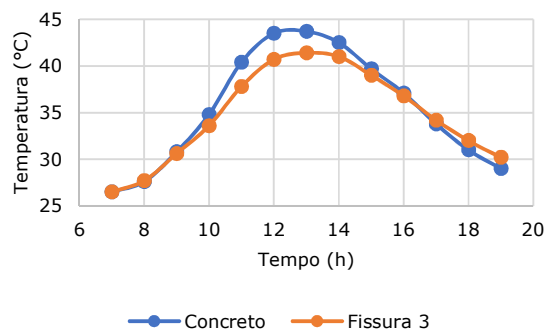


Figura 6: Temperatura do Corpo de Prova 3.

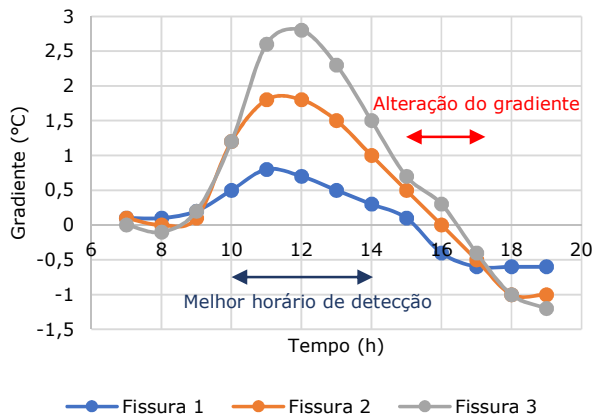


Figura 7: Gradientes térmicos dos corpos de prova.

Para uma melhor visualização deste comportamento, na Figura 8a é apresentado o termograma capturado às 07 horas, que representa o comportamento das primeiras horas da manhã, onde não há gradientes. Na Figura 8b, é capturado o termograma das 11 horas, que está no período de máximos gradientes. A Figura 9a mostra o período da alteração do gradiente térmico, através de um termograma tomado às 16 horas. Finalmente a Figura 9b mostra um termograma capturado durante a noite, às 19 horas, onde os gradientes térmicos negativos são observados. Nos termogramas apresentados as cores escuras, tonalidades roxas, representam baixas temperaturas e as cores claras, tonalidades amarelas, representam altas temperaturas.

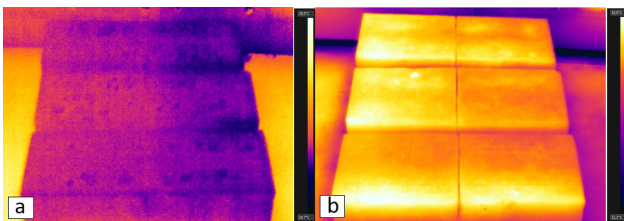


Figura 8: Termogramas às: a) 7 horas e b) 11 horas.

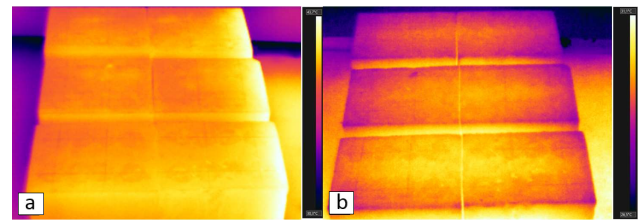


Figura 9: Termogramas às: a) 16 horas e b) 19 horas.

A Figura 10 mostra a relação entre a temperatura, umidade relativa e os gradientes. Pode-se observar que os gradientes ocorreram quando a temperatura ambiente é maior e há baixa umidade relativa; no caso de gradientes negativos, estes ocorreram quando a umidade relativa é elevada e a temperatura ambiente baixa em comparação com as horas do dia.

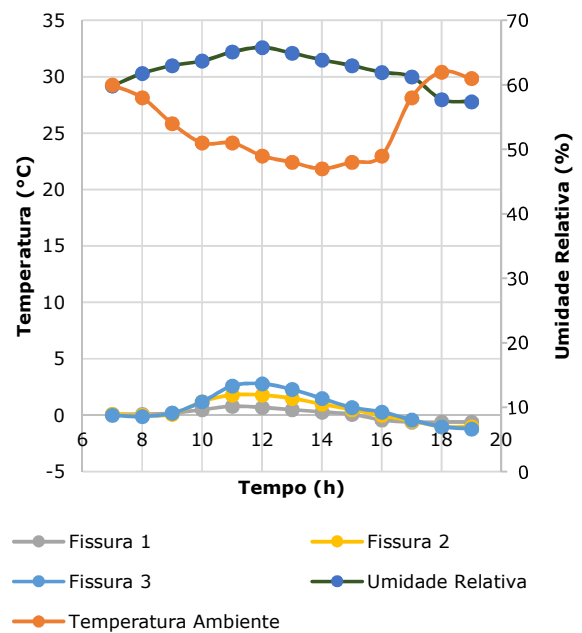


Figura 10: Gradientes em relação a temperatura ambiente e umidade relativa.

O comportamento das fissuras observadas pode ser explicado: nas horas antes do amanhecer não há a presença de uma fonte de calor, assim, os corpos de prova estão em equilíbrio térmico com o meio ambiente, sem a ocorrência de gradientes; nas primeiras horas da manhã, quando o sol começa a aquecer o corpo, existe uma diferença de temperatura

<http://dx.doi.org/10.25286/rep.v2i3.688>

entre o meio ambiente e o concreto com menor temperatura, criando gradientes térmicos, isto porque defeitos no concreto são normalmente preenchidos com água ou ar, neste caso ar, que tem uma condutividade térmica diferente do concreto, então as fissuras são aquecidas e esfriadas de forma diferente das áreas intactas do concreto, o que permite serem detectadas nos termogramas [2].

Neste caso específico, a radiação solar penetra na fissura e é refletida sobre suas paredes, e uma porção dela é absorvida, aquecendo-a como Sham, Chen e Long explicaram na sua pesquisa [3], mostrada na Figura 11a; por esse motivo, esta região não fica aquecida da mesma forma que a superfície totalmente exposta do concreto íntegro, tendo uma temperatura mais baixa, como é demonstrado nas Figuras 4, 5 e 6. Em relação à profundidade da fissura, quanto maior o seu valor, mais área deverá ser aquecida pela radiação absorvida; por esse motivo, quanto menor a profundidade, mais quentes são as paredes das fissuras, e a radiação térmica emitida é mais elevada em comparação com as outras.

Nos horários da noite, quando a temperatura ambiente começa a cair, a temperatura da superfície do concreto intacto esfria mais rápido do que a superfície fissurada, pela mesma razão de não ter a fonte de radiação solar direta. As fissuras perdem calor em uma taxa mais lenta devido ao mesmo fenômeno do dia, mas em sentido inverso; a radiação térmica é emitida a partir das paredes, não sendo diretamente exposta, pois reflete nas últimas, sendo uma parte absorvida como é mostrado na Figura 11b, tornando o processo de esfriamento lento, por isso são mostrados nos termogramas como pontos mais quentes em relação ao concreto.

A umidade relativa ajuda no desenvolvimento de gradientes, principalmente à noite, uma vez que o ar úmido penetra mais rapidamente do que o ar seco no concreto, criando uma transferência de calor por convecção entre a temperatura ambiente e o concreto [18]. Neste caso, a umidade relativa interfere em parte, para o desenvolvimento de gradientes térmicos durante a noite, uma vez que há uma elevada umidade relativa durante estas horas.

Os dados e os resultados mostraram que as alterações nos parâmetros ambientais durante o dia desenvolveram gradientes térmicos no concreto, o que levou à identificação de defeitos e análise subsequente.

Os gradientes térmicos encontrados nos corpos de prova analisados indicam a capacidade da termografia infravermelha na detecção de fissuras com diferentes profundidades. No entanto, vale salientar que os valores obtidos podem ser diferentes para fissuras reais –até para aquelas que tenham as mesmas características- visto que dependem das condições ambientais locais e de outros parâmetros não considerados nesta pesquisa, tais quais nebulosidade e velocidade do vento.

5 Conclusões

Após o experimento, verificou-se que a termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo em concreto é eficaz porque é capaz de analisar grandes áreas em pequenos intervalos de tempo. Pode ser realizado a distância. As fissuras são detectadas sem problemas, sendo visíveis na maior parte do dia com o uso da câmera, e os resultados são imediatos.

As fissuras apresentam temperaturas mais baixas durante o dia e ligeiramente superiores durante a noite em relação a outras áreas do concreto sem defeitos. Observou-se também que, quanto maior é a profundidade da fissura, mais fria se torna em relação às fissuras mais superficiais. Deve-se notar que a termografia infravermelha depende das condições ambientais, para o qual devem ser observadas as melhores condições locais onde será realizado o ensaio. A análise qualitativa não fornece muita informação e deve ser feito uma análise mais rigorosa nos termogramas.

Em muitos casos, a ocorrência de fissuras verticais pode ser produto da corrosão, onde a termografia

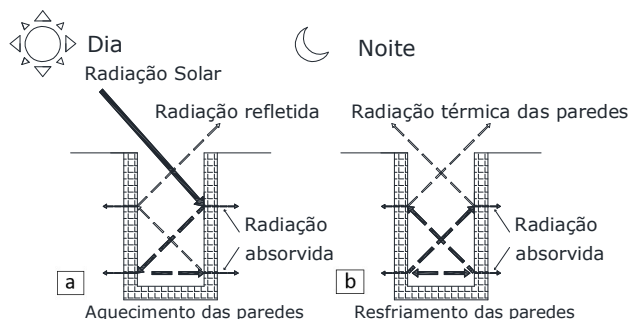


Figura 10: Radiação nas fissuras no a) dia e na b) noite

infravermelha pode ser utilizada para a inspeção deste problema em estruturas de concreto armado.

Apesar de encontrar uma relação entre a profundidade da fissura e sua temperatura, o ensaio não fornece informação sobre o valor da profundidade. Então, recomenda-se utilizar uma combinação com outros ensaios não destrutivos caracterizá-la.

Outras pesquisas podem explorar a influência de outras variáveis na detecção de fissuras como velocidade do vento e cobertura de nuvens até mesmo realizar o ensaio sem a presença do sol.

Agradecimentos

À CAPES pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] ALANI, A.; ABOUTALEBI, M.; KILLIC, G. Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges. *NDT&E International*, v. 61, p. 80-94, 2014.
- [2] GUCUNSKI, N.; IMANI, A.; FRANCISCO, R.; NAZARIAN, S.; YUAN, D.; WIGGENHAUSER, H.; KUTRUBES, D. *Non-destructive Testing to Identify Bridge Deck Deterioration*. 2nd ed. Washington: SRHP, 2013. 96p.
- [3] SHAM, F.; CHEN, N.; LONG, L. Surface crack detection by flash thermography on concrete surface. *Insight*, v. 50, n. 5, p. 240-243, 2008.
- [4] REHMAN, S.; IBRAHIM, Z.; MEMON, S.; JAMEEL, M. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, v. 107, n. 15, p. 58-86, 2016.
- [5] AGGELIS, D.; KORDATOS, E.; SOULIOTI, D.; MATIKAS T. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *NDT&E International*, v. 24, n. 10, p. 1888-1897, 2010.
- [6] WAN, K.; LEUNG, C. Fiber optic sensor for the monitoring of mixed mode cracks in structures, *Sensors and Actuators*, v. 135, n. 3, p. 370-380, 2007.
- [7] CERDEIRA, F.; VÁSQUEZ, M. E.; COLLAZO, J.; GRANADA, E. Applicability of infrared thermography to the study of the behavior of stone panels as building envelopes. *Energy and Buildings*, Oxford, v. 43, n. 8, p. 1845- 1851, 2011.
- [8] WATASE, A.; BIRGUL, R.; HIASA, S.; MATSUMOTO, M.; MITANI, K.; CATBAS, F. N. Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation. *Construction and Building Materials*, v. 101, n.1, p. 1016-1030, 2015.
- [9] BAGAVATHIAPPAN S.; LAHIRI B.; SARAVANAN T.; PHILIP J. Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, v. 60, n. 1, p. 35-55, 2013.
- [10] HIASA, S.; CATBAS, F. N.; MATSUMOTO, M.; MITANI, K. Monitoring concrete bridge decks using infrared thermography with high speed vehicles. *Structural Monitoring and Maintenance*, v. 3, n. 3, p. 277-296, 2016.
- [11] CORTIZO E. C.; BARBOSA, M. P.; SOUZA, L. A. C. Estado da arte da termografia. *Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável*, v. 2, n. 2, p. 158-193, 2008.
- [12] VAGHEFI, K.; AHLBORN, T.; HARRIS, D. K.; BROOKS, C. Combined Imaging Technologies for Concrete Bridge Deck Condition Assessment. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 29, n. 4, p. 1-8, 2015.
- [13] FLIR. User's manual FLIR Exx Series. 1st ed. Wilsonville: FLIR, 2013. 100p.
- [14] MAIERHOFER, C.; ARNDT, R.; ROLLIG, M.; RIECK, C.; WALTHER, A.; SCHEEL, H.; HILLEMEIER, B. Application of Impulse-Thermography for Non-Destructive Assessment of Concrete Structures. *Cement and Concrete Composites*, v. 28, n. 4, p. 393-401, 2006.
- [15] WHASER G. Advances in the use of thermographic imaging for the condition assessment of bridges. *Bridge Structures*, v. 8, n. 2, p. 81-90, 2012.
- [16] CLARK, M.; MCCANN D.; FORDE, M. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry

bridges. NDT&E International, v. 36, n.4, p. 265-275, 2003. ISSN: 0963-8695.

[17] WASHER, G.; FENWICK, R.; BOLLENI, N. Development of Hand-held Thermographic Inspection Technologies. 1st ed. Jefferson City: MODOT, 2009. 120p.

[18] WASHER, G.; FENWICK, R.; BOLLENI, N. Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete. Journal of Bridge Engineering, vol. 15, n. 4, p. 384-390, 2010.