

Monitorização de fendas em superfícies de betão através de análise de imagens multitemporais

Monitoring cracks on concrete surfaces using multi-temporal images

Jónatas Valença
Bruno O. Santos
Eduardo Júlio

Resumo

A caracterização da fendilhação tem elevada importância na avaliação do estado de conservação de estruturas de betão. Os autores desenvolveram anteriormente métodos baseados em processamento de imagem com esse objetivo. Os recentes avanços em "registo de imagem" apresentam um enorme potencial, permitindo desenvolver métodos simples e mais adequados para aplicação *on-site*.

Este artigo apresenta a primeira versão do método MCrack-Propagation, baseado na relação entre características de imagens. A principal vantagem centra-se na correspondência automática de características entre pares de imagens da mesma região, adquiridas em instantes distintos, permitindo o acompanhamento automático da evolução de fendas em superfícies de betão.

O MCrack-Propagation tem elevada precisão na medição da largura de fendas, apresentando maior fiabilidade relativamente aos métodos anteriormente desenvolvidos, devido ao maior número de pontos de medição. Este método apresenta um baixo custo computacional, evitando procedimentos intensivos de segmentação de imagem, ou o contacto direto com a fenda requerido pelos métodos tradicionais.

Palavras-chave: Monitorização automática de fendas / Fendilhação no betão / Processamento de imagem / Visão por computador / Correspondência de características de imagem

Abstract

For concrete structures, the characterization of cracks plays an extremely important role in the scope of structural health monitoring. The authors have already developed methods based on computer vision and image processing with this goal. Recent research advances in image registration have a significant potential to develop simple and light methods, prone for on-site monitoring.

In this paper, a first approach of MCrack-Propagation method is presented, based on matching image features. The main improvement is the automatic feature matching between pairs of multi-temporal images of the same region. This enables to automatically track the evolution of cracks width on concrete surfaces.

The MCrack-Propagation improved the reliability of crack width measurement due to the higher number of measuring points than in previously methods. It is also light and easy to implement avoiding work intensive procedures, as those using image segmentation or traditional methods that require experts to contact with the cracks.

Keywords: Automatic crack monitoring / Concrete cracking / Image processing / Computer vision / Feature matching

Jónatas Valença

CERIS, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil
Lisboa, Portugal
jonatas.valena@tecnico.ulisboa.pt

Bruno O. Santos

CERIS, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil
Lisboa, Portugal
oliveirasantos@tecnico.ulisboa.pt

Eduardo Júlio

CERIS, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil
Lisboa, Portugal
eduardo.julio@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

VALENÇA, J. [et al.] – Monitorização de fendas em superfícies de betão através de análise de imagens multitemporais. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 9. ISSN 2183-8488. (março 2019) 109-116.

1 Introdução

A visão por computador tem, cada vez mais, um enorme potencial e interesse para diversas áreas do conhecimento e, em particular, para a Engenharia Civil. Os desenvolvimentos recentemente registados fornecem uma ampla variedade de soluções para avaliação estrutural e material. As soluções encontradas apresentam abordagens económicas e não invasivas quando comparadas com os métodos tradicionais. Além disso, representam uma ferramenta importante para suporte de inspeções periódicas, onde a sua incorporação permite obter novos parâmetros ou resultados redundantes, de onde resulta uma avaliação mais detalhada e discretizada das estruturas.

No caso particular das estruturas de betão, têm sido apresentadas várias abordagens para avaliação da fendilhação através de visão por computador. De uma forma geral, é detetado o padrão de fendilhação por processamento de imagens, recorrendo à binarização de imagens [1], seguida da aplicação de morfologia matemática [2-5]. Foram também desenvolvidos métodos para melhorar os resultados anteriores, focados essencialmente no pré-processamento como solução para melhorar a qualidade da imagem, eliminando o ruído existente [6, 7]. Noutros trabalhos, a abordagem incide na teoria da percolação que mimetiza o modelo de percolação de fluidos [8-11]. Alguns autores têm desenvolvido métodos para avaliar a evolução entre inspeções [12], tendo a maior parte incidido na comparação dos resultados finais e não nas alterações das imagens adquiridas [4]. Noutro tipo de abordagem, foram desenvolvidos métodos para avaliar a abertura de fendas com base em correlação de imagem (DIC – Digital Image Correlation) [13-15] que, no entanto, apresentam ainda um elevado custo computacional. Para ultrapassar este problema, a fotogrametria foi usada para prever a fendilhação com base nas deformações dos elementos [16-18]. Esta abordagem, apropriada para trabalhos de laboratório, devido à necessidade de alvos artificiais na estrutura, torna-se exaustiva e de difícil execução em estruturas em serviço. Foram também já apresentados contributos através da aplicação de Correlação Cruzada Normalizada para combinar nós e junções entre imagens consecutivas [19].

Neste artigo, é apresentado o método "MCRack-Propagation", desenvolvido para mapear a evolução de fendas sem recurso a alvos artificiais. O método é sustentado pela deteção, extração e correspondência de características entre imagens consecutivas da superfície de betão e foi projetado para poder funcionar como complemento ao método MCRack, desenvolvido pelos autores [4, 12]. O método foi calibrado e validado através da sua aplicação a um ensaio de um provete de argamassa previamente ensaiado à rotura, o qual foi igualmente avaliado através de métodos tradicionais e do MCRack [4, 12] e, posteriormente, aplicado a ensaios de vigas de betão armado. Os resultados mostram que o recurso às características naturais das superfícies de betão para monitorizar a sua fendilhação é uma abordagem que merece atenção, tendo potencial para ser melhorada em desenvolvimentos futuros.

2 Método MCrack-Propagation

O método MCrack-Propagation visa melhorar a monitorização de fendas em superfícies de betão e as suas principais etapas encontram-se representadas no fluxograma da Figura 1. Nas subsecções seguintes cada uma das etapas é descrita em detalhe.

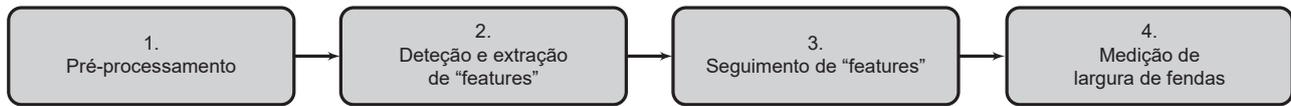


Figura 1 Fluxograma do método MCrack-Propagation

2.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento inclui toda a manipulação de dados (imagens) com o objetivo de os deixar em condições de serem processados na fase seguinte. Neste caso, o *script* desenvolvido permite selecionar a área de intervenção na própria imagem.

2.2 Detecção e extração de características

Nesta etapa é necessário proceder à deteção de características nas imagens, para permitir a sua posterior monitorização. As características são elementos que, tendo em conta aspetos inerentes à própria imagem, definem pontos que se destacam e que têm características próprias. Assim foi utilizado o algoritmo SURF [20] que faz parte da biblioteca OpenCV para Python [21]. Esta etapa do método devolve um conjunto de pontos-chave únicos, detetados nas imagens e que não são sensíveis a variações de escala e de rotação da própria imagem.

2.3 Acompanhamento das características

Os pontos-chave detetados com o algoritmo SURF são comparados entre pares de imagens. As imagens de diferentes instantes temporais são confrontadas com uma imagem de referência. Este procedimento é realizado com recurso ao algoritmo BF Matcher (Brute Force Matcher) da biblioteca Python [21], que permite comparar todos os pontos entre pares de imagens, estabelecendo correspondência entre pares de pontos com base em características que os definem. É de salientar que, neste processo, podem ser estabelecidas algumas falsas correspondências. Para resolver este problema, é utilizado um processo seletivo, baseado no nível de semelhança entre características, como descrito por Lowe [22].

2.4 Medição da abertura de fendas

O cálculo da abertura de fendas baseia-se na medição da distância entre os mesmos pontos-chave em pares de imagens de diferentes instantes. Com esse objetivo, é selecionada, pelo utilizador,

uma região de cada lado da fenda em análise. Estas regiões são consideradas corpos rígidos e permitem calcular a média do deslocamento de cada uma delas, através do acompanhamento dos seus próprios pontos-chave. A comparação do deslocamento médio de cada corpo rígido pode ser referida como medida de abertura da fenda. Este valor é medido em píxeis, por ser a unidade nativa das imagens, sendo posteriormente convertido em milímetros através do conhecimento da resolução espacial.

3 Resultados

O método MCrack-Propagation foi aplicado em dois cenários diferentes: (i) no ensaio de um provete de argamassa, através de um mecanismo contruído para o efeito [12] (ver Figura 2); e (ii) no ensaio de flexão até à rotura de vigas de betão [18] (ver Figura 6). No primeiro caso, foi aplicado um deslocamento em quatro fases, aumentando sucessivamente a abertura da fenda, e estes foram comparados com a fase de referência, que representa as condições iniciais, sem abertura visível da fenda. No segundo caso, a superfície da viga foi pintada com alvos na região crítica (no âmbito de outro estudo [18]), embora esteja sem alvos numa outra região, tornando igualmente possível testar o método nessas condições. Foram avaliadas também quatro fases do ensaio, durante o qual surgiram várias fendas. Essas fases foram comparadas com a fase de referência, correspondente ao instante imediatamente antes do início do carregamento do ensaio.

3.1 Validação em provete de argamassa

Para validar o método, este foi aplicado e comparado com os resultados de Valença *et al.* [12]. Neste trabalho, o provete de argamassa foi produzido com parafusos embebidos nos dois lados menores (e opostos) e ensaiado à flexão até à rotura. Posteriormente, foi colocado no mecanismo de ensaio, o qual permite deslocamentos horizontais, através da manipulação dos parafusos referidos. Esta solução permite obter diferentes aberturas de fenda, para várias fases. Os resultados foram comparados com os métodos tradicionais, nomeadamente uma régua de largura padrão (CWR – *crack width ruler*) e um ampliador de fendas graduado (CM – *crack magnifier*),

e com um método baseado no processamento de imagens [4, 12]. Este último executa a binarização da imagem para segmentar a fenda e, de seguida, mede e localiza três aberturas ao longo de seu comprimento: (i) a abertura mínima; (ii) a abertura máxima; e (iii) a abertura média. As medições foram então convertidas de píxeis para milímetros, com base numa resolução espacial de 0,0684 mm/px e com um desvio padrão de 0,0018 mm/px.

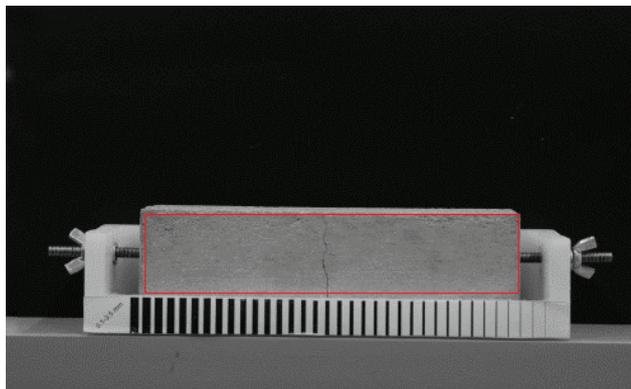


Figura 2 Provete de testes com marcação da região de interesse

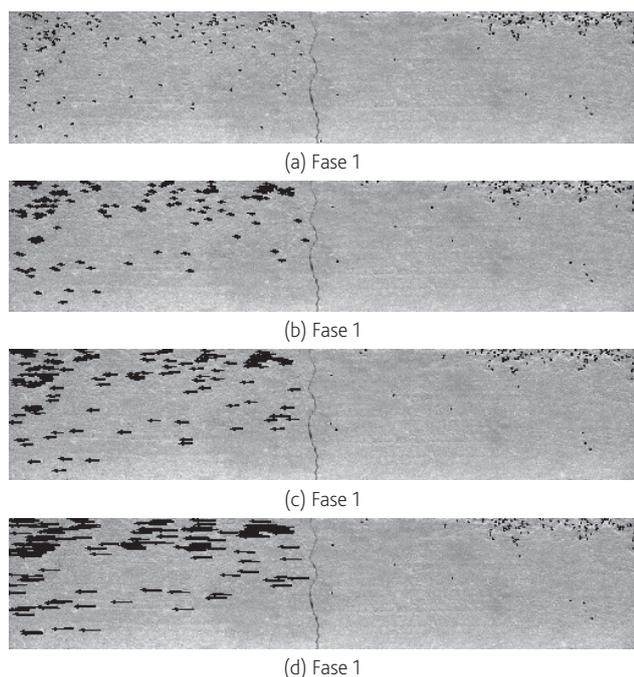


Figura 3 Vetores dos deslocamentos horizontais medidos para cada característica detetada nas quatro fases por comparação com a referência (fase 0)

A etapa de pré-processamento incluiu a exportação de imagem de arquivos RAW para *.tiff seguida da seleção de região de interesse

(ROI), delimitada com um retângulo a vermelho na Figura 2. Esta ROI exclui o fundo e o mecanismo de suporte utilizado para aplicar os deslocamentos horizontais no provete. Inclui a superfície do provete, que se divide em dois corpos rígidos, separados pela fenda vertical. A fase inicial (fase 0) é utilizada para validar o correto acompanhamento das características identificadas. A correspondência entre pontos-chave de cada par de imagens é executada corretamente pelo algoritmo, dado que os deslocamentos desses pontos-chave são nulos nesta fase. Nas fases seguintes, os deslocamentos desses pontos-chave são mapeados. A Figura 3 representa os vetores de deslocamentos medidos em cada fase nos pontos-chave, sobrepostos na imagem de referência (fase 0).

No Quadro 1 são apresentadas as medições obtidas, em píxeis e em milímetros, para a média de deslocamento dos pontos-chave do corpo rígido. Estas últimas foram obtidas através da resolução espacial calculada na fase 0 com recurso a uma régua padrão [12]. Foram ainda medidas as aberturas de fenda com recurso a métodos tradicionais para efeitos de comparação, identificados como CWR (régua de largura padrão) e CM (amplificador de fendas graduado) (Figura 4).



Figura 4 Métodos tradicionais: (a) amplificador de fendas graduado (CM); (b) régua de largura padrão (CWR)

A Figura 5 compara as medições adquiridas através dos diferentes métodos para cada uma das fases de abertura de fenda (w). Pode constatar-se que as aberturas medidas através do método proposto são da mesma ordem de grandeza das registadas com os métodos de medição tradicionais (CWR e CM). A exceção prende-se com a fase 1, podendo esta ser justificada com a falta de rigor dos métodos tradicionais para medir fendas de abertura reduzida, devido a dificuldades de acuidade visual do utilizador. No caso de aberturas superiores, os métodos tradicionais fornecem medições com menos desvio relativamente ao método proposto, dado que o utilizador tem maior facilidade em visualizar e confrontar a abertura da fenda com a graduação ou padrão corretos.

A comparação do MCrack-Propagation com o método proposto por Valença *et al.* [11] revela que este novo método é mais robusto, dado que está focado no deslocamento das características detetadas. Assim, não depende da qualidade da imagem ou da deteção da fronteira da fenda que, por vezes, não é definida de forma clara e está mais suscetível de se alterar com o tempo. Isto justifica a maior proximidade com os resultados dos métodos tradicionais. Além disso, o processamento de imagem previamente desenvolvido mede a largura de fenda em vários pontos, ou seja, valores máximo ($w_{máx}$),

mínimo (w_{min}) e médio ($w_{méd}$), o que pode ser incorreto, atendendo a que se um corpo rígido se move horizontalmente, assume-se que a fenda deve ter a mesma abertura ao longo de todo o seu comprimento.

Quadro 1 Deslocamento horizontal por fase analisada

Valença <i>et al.</i> [11]								MCrack-Propagation	
CWR	CM	W_{min}	$W_{méd}$	$W_{méd}$	$W_{méd}$	$W_{méd}$	$W_{méd}$	W	W
(mm)	(mm)	(mm)	(px)	(mm)	(px)	(mm)	(px)	(mm)	(px)
0,5	0,5	0,247	3606	0,496	7255	0,931	13602	0,279	4082
1,0	1,0	0,727	10630	1,087	15881	1,587	23195	1,127	16473
2,0	2,0	1,256	18358	1,682	24590	1,989	29067	1,940	28357
3,0	2,9	1,847	27000	2,501	36549	3,038	44407	3,112	45493

CWR – medição com régua de largura padrão; CM – medição com amplificador de fendas graduado;

MCrack-Propagation – método proposto (em milímetros (mm) e em píxeis (px)).

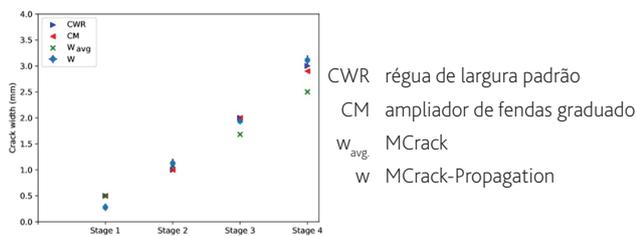


Figura 5 Medição da variação de abertura de fendas pelos métodos considerados

3.2 Aplicação em ensaios de vigas de betão

O método MCrack-Propagation foi aplicado na medição da abertura de fendas na zona central de uma viga submetida a um ensaio de flexão (Figura 6). Neste caso, a principal diferença está relacionada com o facto de existirem várias fendas e, conseqüentemente, vários blocos de corpo rígido a considerar. Foi definida uma região de interesse, representada pela linha a vermelho na Figura 6 e, dentro dessa mesma região de interesse, foram selecionadas quatro áreas de medição, as quais correspondem aos corpos rígidos. Nesta abordagem, foram consideradas as seguintes simplificações: (i) foi desprezado o efeito de rotação de corpos rígidos adjacentes; e (ii) as características presentes numa determinada área de medição são reduzidas a uma média, o que é teoricamente incorreto dado que a zona superior deverá apresentar deslocamento de valor mais baixo relativamente à zona inferior das fendas.

Foram avaliadas as aberturas de três fendas que se formaram na região de interesse durante o ensaio. Conforme já referido, embora a viga estivesse instrumentada com alvos circulares, o método

apresentado foi também aplicado numa área livre desses mesmos alvos, em particular no corpo rígido mais à direita, designado "R. Body 0". No caso desta viga, e tendo em conta que cada uma das fendas depende do movimento de dois corpos rígidos, localizados à esquerda e à direita, a sua abertura resulta da soma de deslocamentos de ambas as partes. Como exemplo, são apresentados graficamente os resultados para a fenda 2 na Figura 7.

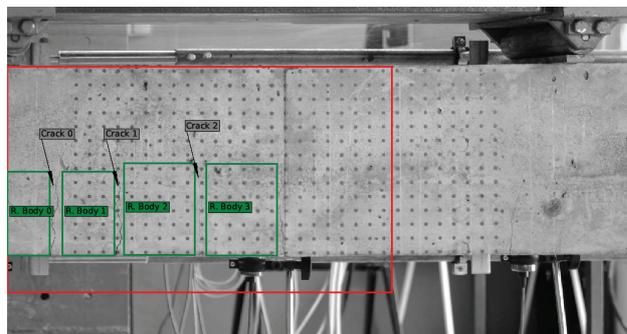


Figura 6 Viga testada, com a região de interesse indicada a vermelho e as áreas consideradas com comportamento de corpo rígido a verde

O Quadro 2 apresenta as medições de abertura (deslocamento horizontal, u) para cada uma das fendas consideradas, em píxeis e em milímetros, sendo ainda apresentado o número de pontos de medição (pts) que foram utilizados em cada fase. O número de características identificadas é da exclusiva responsabilidade dos algoritmos de deteção SURF e de correspondência BF-Match. Como forma de ultrapassar esta questão, futuramente deverá aplicar-se uma solução final baseada em diferentes algoritmos, de forma a tirar o melhor de cada um deles, e assim aumentar o número de medições. Uma alternativa para aumentar o número de medições poderá consistir em fazer medições entre fases consecutivas, ao invés de o fazer sempre em relação à fase de referência (face 0).

Quadro 2 Medições de variação de abertura horizontal de fenda (u) para as quatro fases em todas as fendas consideradas (valores em píxeis e em milímetros)

Fase	Fenda 0		Fenda 1		Fenda 2				
	u	pts	u	pts	u	pts			
	(px)	(mm)	(-)	(px)	(mm)	(-)			
#1	0404	0,102	132	2994	0,758	166	2401	0,608	263
#2	1233	0,312	93	5520	1,398	105	3172	0,803	211
#3	3446	0,872	64	7157	1,812	79	7223	1,829	151
#4	3750	1,456	51	9742	2,466	88	7432	1,881	157

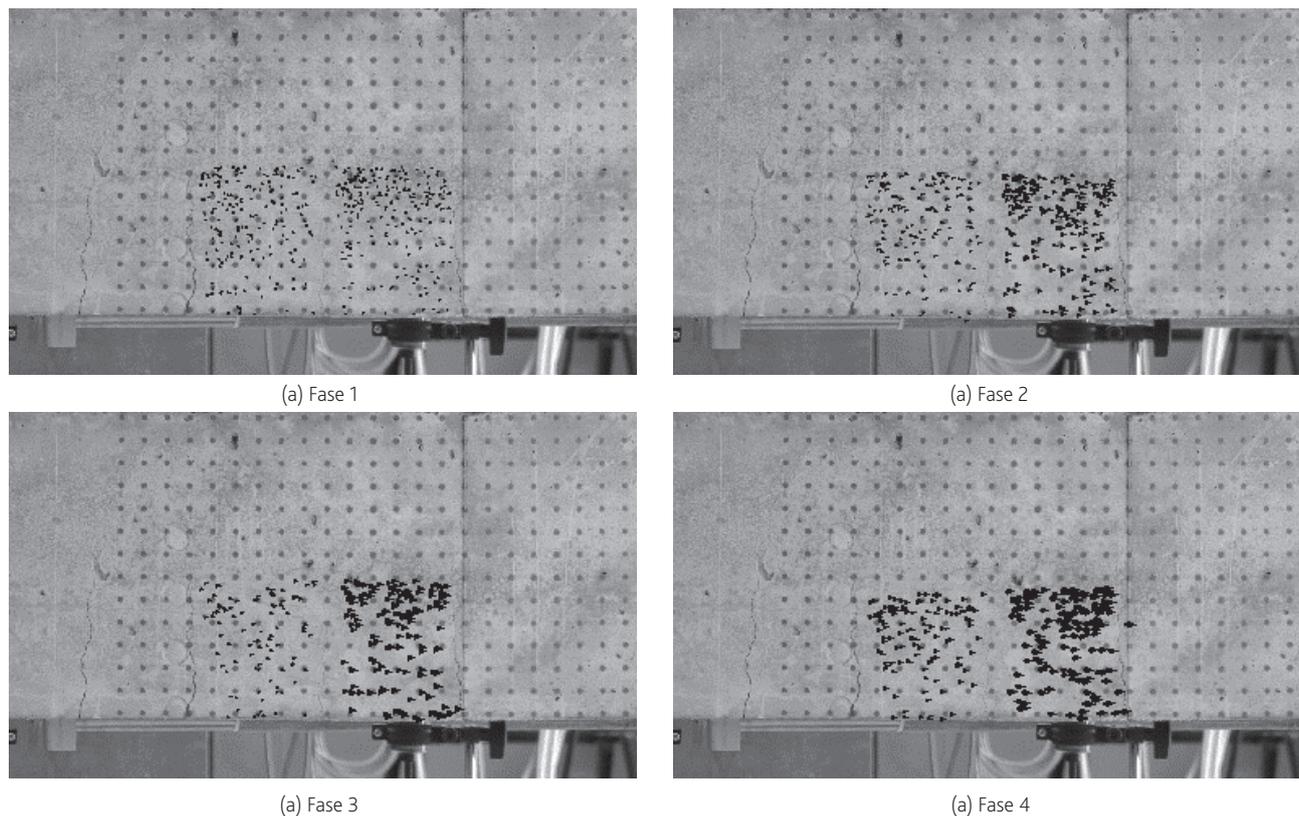


Figura 7 Vetores dos deslocamentos horizontais nos pontos considerados para as quatro fases no caso da fenda 2

4 Conclusões

Neste artigo é apresentada uma primeira abordagem do método MCrack-Propagation, desenvolvido para monitorizar a abertura de fendas em estruturas de betão. O método deteta características em corpos rígidos, seleccionados em ambos os lados da fenda, para, posteriormente, acompanhar e calcular os seus deslocamentos no tempo.

O MCrack-Propagation representa um passo importante na monitorização da abertura de fendas em superfícies de betão e provou ser um método fiável para monitorizar a abertura de fendas a partir de características naturais da superfície, sem a necessidade de alvos artificiais. Após a validação num provete de argamassa, a aplicação em vigas de betão mostrou que o MCrack-Propagation é adequado para a avaliação de estruturas em serviço, permitindo monitorizar a abertura em três fendas seleccionadas a partir dos deslocamentos dos pontos-chave das características da sua superfície. Além disso, provou ser ainda mais preciso do que os métodos tradicionais, os quais dependem da intervenção humana, ficando por isso sujeitos a erros, especialmente no caso de fendas mais finas. Apresenta ainda a vantagem, relativamente ao MCrack, de não estar dependente da modelação das fronteiras das fendas.

As características detetadas pelo método MCrack-Propagation não apresentam uma distribuição uniforme por toda a superfície de betão avaliada. Embora este facto possa induzir desvios nos resultados, o mesmo tende a desaparecer para o deslocamento em uma única direção. No entanto, esta realidade constitui uma desvantagem no desempenho do método que deve ser ultrapassada.

Por fim, pode afirmar-se que os resultados do MCrack-Propagation mostram que a utilização de características naturais da imagem para monitorizar a fendilhação no betão é uma abordagem que merece atenção e deve ser alvo de desenvolvimentos futuros. As melhorias a implementar podem incluir a introdução de ruído nas superfícies antes da aquisição de imagem ou a utilização de imagens com diferentes resoluções espaciais e/ou radiométricas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e à Tecnologia (FCT), pelo financiamento do projeto PTDC/ECM-EST/6830/2014, intitulado "AerialCrackView: Monitorização de fissuras em pontes de betão através de processamento de imagens multi-espectrais obtidas com veículos aéreos não-tripulados", e pelo financiamento da bolsa de post-doc SFRH/BPD/102790/2014.

Referências

- [1] Otsu, N. (1979) – "A threshold selection method from gray-level histograms". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, N. 1, pp. 62-66.
- [2] Fujita, Y.; Mitani Y.; Hamamoto, Y. (2006) – "A method for crack detection on a concrete structure". *Proceedings – International Conference on Pattern Recognition*, pp. 901-904.
- [3] Valença, J.; Puente, I.; Júlio, E.; González-Jorge, H.; Arias-Sánchez, P. (2017) – "Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey". *Construction and Building Materials*, Vol. 146, pp. 668-678.
- [4] Valença, J.; Costa, D.; Júlio, E. (2012) – "Characterisation of concrete cracking during laboratorial tests using image processing". *Construction and Building Materials*, Vol. 28, N. 1, pp. 607-615.
- [5] Carmo, R.N.F.; Valença, J.; Silva, D.; Dias-da-Costa, D. (2015) – "Assessing steel strains on reinforced concrete members from surface cracking patterns". *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 265-275.
- [6] Fujita, Y.; Hamamoto, Y. (2009) – "A robust method for automatically detecting cracks on noisy concrete surfaces". *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 5579 LNAI. pp. 76-85.
- [7] Fujita, Y.; Hamamoto, Y. (2001) – "A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces". *Machine Vision and Applications*, Vol. 22, N. 2, pp. 245-254.
- [8] Yamaguchi, T.; Hashimoto, S. (2006) – "Automated crack detection for concrete surface image using percolation model and edge information". *IECON Proceedings*, pp. 3355-3360.
- [9] Yamaguchi, T.; Nakamura, S.; Saegusa, R.; Hashimoto, S. (2008) – "Image-based crack detection for real concrete surfaces". *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 3, N. 1, pp. 128-135.
- [10] Qu, Z.; Guo, Y.; Ju, F.R.; Liu, L.; Lin, L.D. (2016) – "The algorithm of accelerated cracks detection and extracting skeleton by direction chain code in concrete surface image". *The Imaging Science Journal*, Vol. 64, N. 3, pp. 119-130.
- [11] Qu, Z.; Lin, L.D.; Guo, Y.; Wang, N. (2015) – "An improved algorithm for image crack detection based on percolation model". *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 10, N. 2, pp. 214-221.
- [12] Valença, J.; Júlio, E.; Araújo, H. (2010) – "Intelligent Concrete Health Monitoring (ICHM): An Innovative Method for Monitoring Concrete Structures using Multi Spectral Analysis and Image Processing". *8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby*, Denmark.
- [13] Fayyad, T.; Lees, J. (2014) – "Application of Digital Image Correlation to reinforced concrete fracture". *Procedia Materials Science*, Vol. 3, pp. 1585-1590.
- [14] Hosseini, A.; Mostofinejad, D.; Bonab, M. (2012) – "Displacement Measurement of Bending Tests Using Digital Image Analysis Method". *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, N. 5, pp. 642-644.
- [15] Kwon, H.; Rogalsky, A.; Kovalchick, C.; Ravichandran, G. (2010) – "Application of digital image correlation method to biogel". *Polymer Engineering and Science*, Vol. 50, N. 8, pp. 1585-1593.
- [16] Valença, J.; Carmo, R. (2017) – "Method for assessing beam column joints in RC structures using photogrammetric computer vision". *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 24, N. 11.
- [17] Dias-da-Costa, D.; Valença, J.; Júlio, E.; Araújo, H. (2017) – "Crack propagation monitoring using an image deformation approach". *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 24, N. 10.
- [18] Dias-da-Costa, D.; Valença, J.; Carmo, R. (2014) – "Curvature assessment of reinforced concrete beams using photogrammetric techniques". *Materials and Structures*, Vol. 47, N. 10, 1745-1760.
- [19] Chen, L.; Chao Y.; Jan, H.; Huang, C.; Tien, Y. (2006) – "Measuring System for Cracks in Concrete Using Multitemporal Images". *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 32, N. 2, pp. 77-82.
- [20] Bay, H.; Tuytelaars, T.; Gool, L. (2006) – SURF: Speeded up robust features. *Computer Vision – ECCV 2006. ECCV 2006. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3951, Springer.
- [21] Van Rossum, G. (2007) – Python Programming Language. *USENIX Annual Technical Conference*, Santa Clara, CA, USA.
- [22] Lowe, D.G. (2004) – "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, N. 2, pp. 91-110.
- [23] Yamaguchi, T.; Hashimoto, S. – "Improved Percolation-based Method for Crack Detection in Concrete Surface Images". In *19th International Conference on Pattern Recognition*, 2008.
- [24] Yamaguchi, T.; Hashimoto, S. (2009) – "Practical image measurement of crack width for real concrete structure". *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 92, N. 10, pp. 1-12.
- [25] Yamaguchi, T.; Hashimoto, S. (2010) – "Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing". *Machine Vision and Applications*, Vol. 21, N. 5, pp. 797-809.
- [26] Yamaguchi, T.; Nakamura, S.; Hashimoto, S. (2008) – "An Efficient Crack Detection Method Using Percolation-Based Image Processing", *3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Singapore, pp. 1875-1880.

