

Image-based method for monitoring of crack opening on masonry and concrete using Mobile Platform

Método com base em imagem para o monitoramento da abertura de fissura em alvenaria e concreto usando plataforma móvel

A. P. MARTINS ^a
apms6592@gmail.com.br

J. C. PIZOLATO JUNIOR ^b
jcpizolato@yahoo.com.br

V. L. BELINI ^c
belini@ufscar.br

Abstract

This paper proposes an automatic method based on the computing vision, implemented in a mobile platform, to inspect cracks in masonry and concrete. The developed algorithm for image processing performs this task from images of the cracks evolution. The contribution of this paper is the development of a mobile tool with quick response aiming to assist technicians in periodic visits when monitoring the crack opening in masonry and concrete. The obtained results show, successfully, the dimensional alterations of cracks detected by mobile phone in a faster and accurate way compared with the conventional measurement technique. Regardless the irregular shape of the cracks, the proposed method has the advantage of producing results statistically significant in measurement repetition by decreasing the subjectivity inherent to manual measurement technique.

Keywords: computational vision, image processing, mobile platform, cracks.

Resumo

Este artigo propõe um método automático com base em visão computacional, implementado em uma plataforma móvel, para inspecionar fissuras em alvenaria e concreto. O algoritmo desenvolvido para processamento de imagem realiza esta tarefa a partir de imagens da evolução de fissuras. A contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta móvel, com resposta rápida visando auxiliar os técnicos em visitas periódicas no monitoramento da abertura de fissuras em alvenaria e concreto. Os resultados obtidos mostram, com sucesso, as alterações dimensionais de fissuras detectadas pelo telefone celular de uma maneira mais rápida e precisa em comparação com a técnica de medição convencional. Independente da forma irregular das fissuras, o método proposto tem a vantagem de produzir resultados estatisticamente significativos na repetição de medição, diminuindo a subjetividade inerente à técnica de medição manual.

Palavras-chave: visão computacional, processamento de imagem, plataforma móvel, fissuras.

^a Alexander Pereira Martins, Universidade Estadual de Londrina (UEL) - Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Londrina (UEL), apms6592@gmail.com.br, Londrina, PR, Brasil;

^b José Carlos Pizolato Jr, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), jcpizolato@yahoo.com.br, São Carlos, SP, Brasil;

^c Valdinei Luís Belini, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), belini@ufscar.br, São Carlos, SP, Brasil.

1. Introdução

Nos últimos anos houve um elevado crescimento no segmento de Construção Civil (aumento de 42,41% entre 2004 e 2010), podendo continuar a manter a expansão entre 4 e 5% para os próximos anos [1]. Dessa forma cresce também o número de edificações que apresentam alterações estruturais, em razão de atualizações de projeto e mudanças ambientais locais. Neste contexto, existe cada vez mais a preocupação com a inspeção de estruturas em alvenaria e concreto, que podem apresentar modificações ou avarias visíveis ao longo do tempo.

A análise de fissuras ou trincas é um importante item de segurança a ser avaliado nas vistorias ou inspeções de estruturas na Engenharia Civil [2], [3] e [4]. A vistoria das construções em alvenaria permite observar a estabilidade ou aumento da abertura de fissura, que pode indicar a necessidade de reparos estruturais. O termo abertura de fissura envolve a abertura de uma ou mais fissuras em alvenaria e concreto. A alteração na abertura de fissura é um item referencial na análise do técnico nas vistorias periódicas estruturais. A vistoria é realizada na estrutura avariada em períodos diferentes, para identificar possíveis alterações de fissura.

Um método de monitoramento constante da abertura de fissura é o uso do instrumento extensômetro mecânico ou elétrico, instalado entre as estruturas avariadas. Em outro método, a medição convencional é obtida por um técnico de inspeção, com um instrumento de metrologia dimensional colocado manualmente sobre a estrutura avariada. Na leitura da abertura de uma fissura, o técnico observa no instrumento o traço de medida e o valor da escala correspondente à abertura de fissura.

A observação direta na medição convencional é uma tarefa muito minuciosa e exaustiva e depende da experiência do técnico. Além disso, fatores como cansaço, fadiga e distrações podem contribuir para conduzir a registros de dimensões de fissuras diferentes das dimensões verdadeiras. Embora essa técnica manual seja conhecida e de baixo custo, o tempo demandado nas medições e as imprecisões nos resultados têm motivado a pesquisa por métodos automáticos.

O objetivo do presente trabalho é contribuir com uma ferramenta para a análise comparativa da abertura de fissura em alvenaria e concreto. O propósito é reduzir a carga de trabalho do técnico de inspeção, facilitando e produzindo resultados mais exatos e consistentes (menor erro de repetibilidade).

Muitos trabalhos têm proposto a automatização dos processos de identificação e avaliação da taxa de aumento de fissuras em alvenaria. Alguns trabalhos utilizaram imagens de vídeo, aplicando técnicas de contraste de cor entre agregados do concreto e a argamassa [5], e na detecção de fissuras em pavimento [6] utilizou-se redes neurais artificiais. Todavia, outros trabalhos empregaram rotinas de processamento de imagem para identificar fissuras em alvenaria, com aplicação da análise de Fourier [7], e na detecção de bordas de fissuras aplicando técnicas de binarização da imagem [8], [9] e [10]. Imagens de superfícies em alvenaria preparada com fluorescência foram analisadas para a detecção de microfissuras [11]. Filtros espaciais em imagem colorida foram aplicados para realizar a separação da região da fissura do restante da imagem [12]. Os detectores de borda Sobel e Canny, associados com a transformada rápida de Fourier [13], foram utilizados para identificar a região ocupada por fissuras em alvenaria. Com um algoritmo de processamento de imagem aplicando a

transformada Hough [14], obteve-se a verificação do comprimento e largura (abertura) de fissuras. O detector de borda de Canny e limiarização de Otsu [15] foi utilizado para identificar trincas em tubos de concreto. A medição óptica de câmeras e a expressão de Green-Lagrange [16] são ferramentas que foram aplicadas para medições em fissuras. Filtros de textura na superfície da região de interesse [17] foram utilizados para a identificação de fissuras. Com webcam e ferramentas de imagens do software Matlab [18], torna-se possível encontrar e medir as fissuras em alvenaria. Na aplicação de algoritmo matemático [19] ocorre detecção de fissuras pela diferença de reflexões de radiação de luz termográfica da região intacta da alvenaria. As fissuras são também identificadas por meio de um algoritmo [20] aplicando um filtro mediano na imagem. As técnicas de fotogrametria digital [21] e [22] são utilizadas para medir as dimensões de fissuras e estimar deformações em estruturas da Eng. Civil. Apesar da exatidão e da consistência dos resultados demonstrados por essas propostas, o desempenho da maioria dos sistemas automáticos é dependente de uma plataforma fixa para realizar a medição. A plataforma fixa é composta por uma câmera de vídeo para a aquisição de imagens e um computador pessoal (PC) para executar os algoritmos de processamento e de análise das imagens. Essa exigência contribui para restringir parcialmente o uso de tais métodos em laboratórios de pesquisa ou ambientes restritos.

O aumento da capacidade de processamento e de armazenamento de dados, associados à integração de câmeras de vídeo de alta resolução aos modernos telefones celulares de baixo custo, têm permitido ampliar substancialmente o elenco de aplicações desses sofisticados equipamentos portáteis. Nesse sentido, esse artigo propõe a automação da comparação dimensional de fissuras em alvenaria (alvenaria estrutural ou alvenaria de fechamento) e em concreto, a partir da integração do hardware e do software em uma única plataforma móvel. Para atingir tal objetivo, essa proposta usou como plataforma móvel o aparelho celular Samsung modelo Omnia WSGH-i677 UG, processador de 1,4 GHz e 512 MB (RAM) e sistema operacional Windows Phone 7.5.

Pretende-se contribuir para a redução da subjetividade do técnico no monitoramento da abertura de fissura e das incertezas estatísticas, quando comparadas com o método convencional.

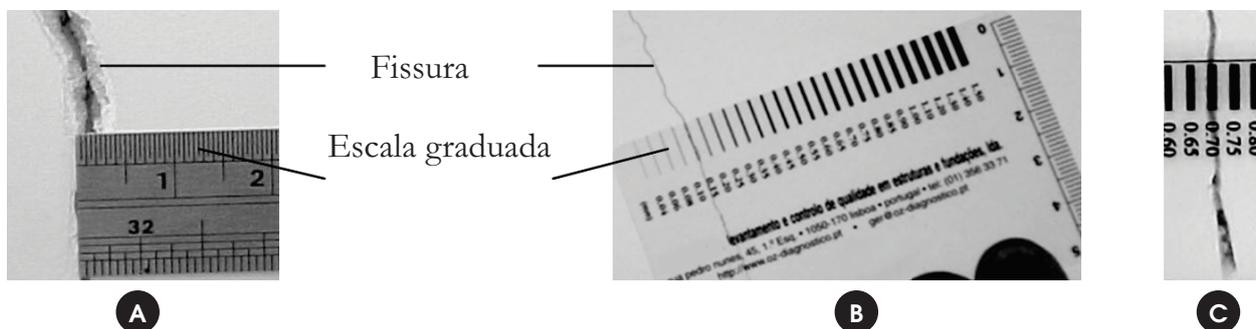
Embora a capacidade de processamento dessas plataformas móveis tenha aumentado, os algoritmos de processamento de imagem originalmente desenvolvidos para PC ainda mostram-se computacionalmente mais complexos, para serem executados diretamente em aparelhos celulares. Nesse contexto, a otimização de um algoritmo de processamento de imagem, tipicamente utilizado em PC, de tal maneira que ele possa ser executado em aparelho celular, representa outra contribuição desse trabalho.

O artigo é organizado conforme a seguir. A Seção 2 apresenta os procedimentos necessários da medição convencional na avaliação do aumento da abertura de fissura em alvenaria. O sistema de monitoramento proposto é descrito na Seção 3. A Seção 4 apresenta o processamento digital da imagem e a Seção 5 discute os resultados obtidos. As conclusões estão na Seção 6.

2. Método convencional

Em um procedimento convencional, o técnico de inspeção verifica o aumento da abertura de fissura ao longo de um período de tempo, por meio da medição manual. Esse tipo de medição ma-

Figura 1 – (a). Escala graduada colocada manualmente sobre a estrutura em alvenaria com fissura, em procedimento de medição convencional. Figura 1(b). Comparador de fissuras colocado sobre a fissura de uma estrutura em alvenaria avariada. Figura 1(c). Detalhe da escala do instrumento comparador, apresentando a indicação de 0,70 mm de abertura de fissura



nual em vistorias é conduzido pelo técnico que utiliza algum instrumento de medida, como uma escala graduada ou comparador de fissuras. A Figura 1 ilustra instrumentos utilizados no método convencional para a medição da abertura de fissura. Os principais problemas desses métodos de medição por comparação são: baixa precisão e rastreabilidade, subjetividade na leitura e as dificuldades de registros dos dados [23].

Outro instrumento dimensional com melhor resolução aplicado no procedimento de medição convencional é o paquímetro digital, ilustrado na Figura 2(a).

Em outro procedimento de medição convencional, o técnico de inspeção utiliza um calibrador de lâminas com espessuras entre 0,1 e 2,0 mm. Nesse procedimento o técnico deve escolher e inserir a lâmina metálica na abertura da fissura, como ilustrado na Figura 2(b). Outro inconveniente na medição com o instrumento calibrador de lâminas é a inserção constante das lâminas de metal. Além do tempo dispendido na troca de lâminas para a medição, a inserção das lâminas pode levar a degradação na região da abertura da fissura, ocasionando medições errôneas e comprometendo o processo de vistoria.

Os instrumentos convencionais de metrologia dimensional apresentam subjetividade no posicionamento manual durante a medi-

ção da abertura da fissura em alvenaria, podendo alterar a análise quantitativa. Outro fator que dificulta o método convencional de medição é a forma irregular das fissuras em alvenaria. Além disso, com os instrumentos convencionais citados não é possível detectar rapidamente pequenas variações da abertura de fissura, devido à sua resolução e a técnica empregada. Como resultado, torna-se necessário realizar várias medições, para a obtenção de uma medida conclusiva.

No procedimento de medição convencional com instrumentos de metrologia há uma incerteza associada ao manuseio do instrumento pelo técnico. Desta forma, o método convencional de medição pode gerar diferentes leituras entre técnicos de inspeção, para a mesma região da fissura em alvenaria ou concreto. Esta inconsistência demanda maior quantidade de medições repetidas para produzir valores mais exatos.

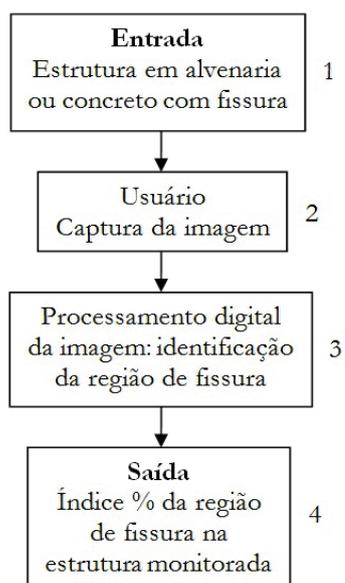
No método de monitoramento contínuo em fissuras, o instrumento extensômetro mecânico ou elétrico é instalado entre as estruturas avariadas [21], mas exige a permanência do mesmo entre as vistorias periódicas.

Com o propósito de reduzir o tempo de trabalho do técnico de inspeção e produzir resultados com maior exatidão, essa proposta visa automatizar a identificação da abertura de fissura em alvenaria e

Figura 2 – (a) Instrumento paquímetro digital num procedimento de medição convencional da fissura em alvenaria. Figura 2 (b). Instrumento calibrador formado por lâminas. Este instrumento numa medição convencional permite uma verificação comparativa entre a abertura da fissura em alvenaria e a espessura da lâmina



Figura 3 – Diagrama em blocos do método proposto para a identificação do aumento da abertura de fissura



concreto. A próxima Seção apresenta o método proposto para o monitoramento de fissura e o sistema de aquisição da imagem.

3. Metodologia proposta

Esse trabalho fundamenta-se na aplicação de técnicas de processamento digital no domínio espacial da imagem em um aparelho

celular. Como resultado, o algoritmo implementado trabalha diretamente a morfologia matemática dos pixels em imagens previamente convertidas para uma matriz binária.

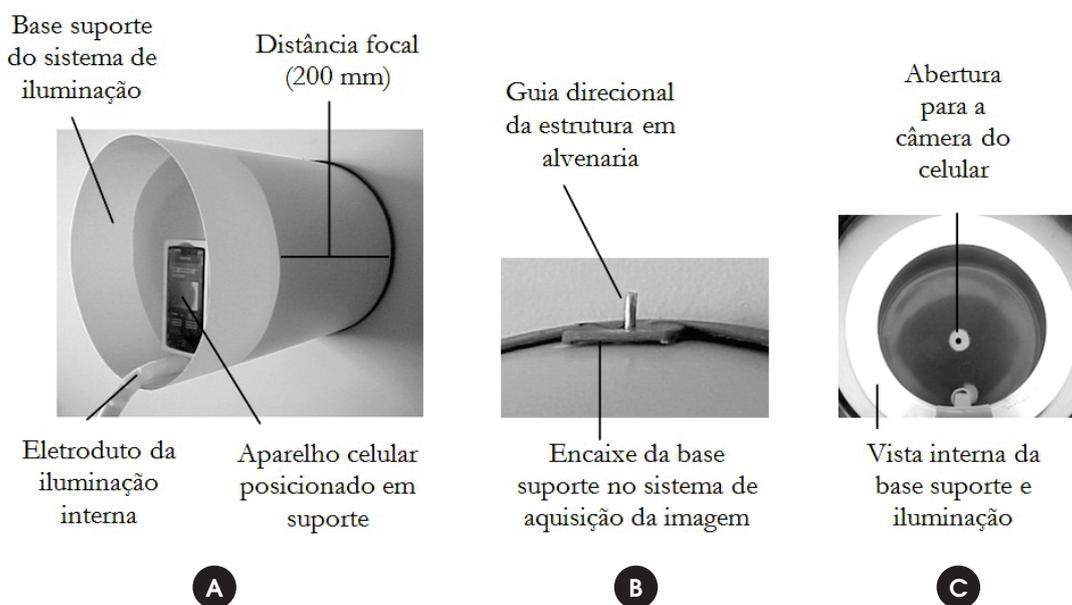
O objetivo do método proposto é obter o índice % da região de fissura na imagem da estrutura em alvenaria ou concreto. O diagrama em blocos da Figura 3 ilustra o método proposto.

A entrada do método proposto (bloco 1 da Figura 3) corresponde a uma estrutura em alvenaria ou concreto com fissura, como mostrado na Figura 1 (estrutura em alvenaria).

O bloco 2 da Figura 3 representa a captura de uma imagem da estrutura com fissura utilizando o aparelho celular, e esta imagem é processada digitalmente no bloco 3. O resultado final do processamento digital, cujo algoritmo será detalhado na Seção 4, consiste na identificação dos pixels que representam a região de fissura na imagem. A partir desta informação é possível identificar a região de fissura na imagem.

O bloco 4 da Figura 3 tem como função calcular o índice % de ocupação de fissura na imagem da estrutura monitorada. Entretanto, o método proposto é sensível a deslocamentos laterais e de distância do aparelho celular em relação à estrutura com fissura a ser analisada. Desta forma, foi proposto a aplicação de uma base suporte para o posicionamento e o alinhamento da câmera fotográfica do aparelho celular em relação à região de fissura, como ilustrado na Figura 4(a). A Figura 4(b) ilustra em detalhes o guia direcional da estrutura e a base suporte do sistema de aquisição da Figura 4(a). Este guia foi proposto com o objetivo de alinhar corretamente o sistema de aquisição da imagem à estrutura em

Figura 4 – Sistema de aquisição de imagem do sistema de visão proposto. (a). Aparelho celular posicionado na base suporte sobre uma estrutura em alvenaria. Neste caso foi ajustada uma distância focal de 200 mm entre a câmera do aparelho celular e a estrutura em alvenaria. (b). Guia direcional da estrutura em alvenaria colocado na base suporte do sistema de aquisição de imagem proposto. (c). Vista interna da base suporte do sistema proposto e o detalhe da abertura para a câmera do aparelho celular localizado atrás da iluminação



alvenaria. Desta forma, a base suporte do sistema de aquisição permite manter o posicionamento constante da câmera do celular em relação à estrutura monitorada em vistorias periódicas.

Teste comparativo para diferentes distâncias entre a estrutura em alvenaria e a câmera do aparelho celular (distância focal) foi realizado. O teste permitiu a constatação de que, para distâncias inferiores a 120 mm ocorre distorção na imagem visualizada na tela do aparelho celular. Essa distorção da imagem é percebida pelo usuário, pois apresenta a fissura com extremidades maiores comparadas à dimensão real. Também verificou-se que distância focal superior a 280 mm ocorre a ausência de visualização do início do surgimento de fissura, e maior erro de repetibilidade nas medições. Neste caso, a distância focal otimizada, para evitar distorções ou perdas de identificação de fissura na imagem corresponde a 200 mm.

Na Figura 4 está ilustrado o sistema de aquisição proposto que utiliza o aparelho celular na obtenção e processamento da imagem de fissura em alvenaria.

Outra característica do sistema de aquisição proposto é o sistema de iluminação com uma lâmpada direcionada para a região da fissura, conforme ilustrado na Figura 4(c). O sistema de iluminação

implementado tem por objetivo evitar interferências de luminosidade, como por exemplo, a alteração de luz ambiente, sombras ou reflexos durante o processo de captura da imagem. O sistema de iluminação evita maiores erros na repetibilidade de leitura do método proposto. Na Figura 4(c) é possível observar os detalhes do dispositivo de iluminação circular posicionado no sistema de aquisição de imagem.

O aparelho celular pode ser facilmente removido do sistema de aquisição para continuar sendo utilizado nas aplicações habituais de comunicação, como pode ser observado na Figura 4 (a).

4. Processamento digital da imagem

O processamento digital proposto é realizado no plano espacial da imagem obtida da estrutura em alvenaria ou concreto. Esse processamento atua diretamente na morfologia dos pixels da imagem. A Figura 5 ilustra o diagrama em blocos do processamento da imagem proposto.

O bloco 1 da Figura 5 representa a imagem da estrutura em alvenaria ou concreto com fissura obtida pelo sistema de aquisição descrito na Seção 3. A imagem de uma fissura em alvenaria ilustrada na Figura 6(a) é quantizada em 256 níveis de cinza.

No bloco 2 do diagrama em blocos da Figura 5, a imagem com 256 níveis de cinza da Figura 6(a) é representada na forma matricial pela função $f(x, y)$, sendo que x e y representam, respectivamente, as coordenadas de linha e de coluna de cada posição do pixel.

O bloco 3 da Figura 5 normaliza os valores de intensidade de pixels (0-255) para o intervalo compreendido entre 0 e 1. Este cálculo é realizado segundo a equação (1) e os novos valores são armazenados na matriz $g(x, y)$.

$$g(x, y) = \frac{f(x, y)}{\max(f(x, y))} \quad (1)$$

Onde: $f(x, y)$ é o valor de intensidade original ($0 \leq f(x, y) \leq 255$); $\max(f(x, y))$: é o maior valor da matriz $f(x, y)$ e $g(x, y)$ é a matriz resultante com valores normalizados ($0 \leq g(x, y) \leq 1$).

A função do bloco 4 da Figura 5 é implementar o processo de binarização da matriz $g(x, y)$. Neste caso, foi aplicada a técnica de segmentação da imagem por limiarização como descrito por [24] e descrita matematicamente pela equação (2).

$$h(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } g(x, y) > L, \\ 0 & \text{se } g(x, y) \leq L \end{cases} \quad (2)$$

No método proposto o limiar L da imagem na equação (2) é ajustado pelo usuário no início do processo de detecção de fissura. O valor é determinado visando identificar o início do surgimento de fissura em razão da tonalidade da estrutura em alvenaria ou concreto. A superfície da estrutura a ser monitorada deve ser preparada, e será descrita na próxima Seção. Nos resultados obtidos, o valor do limiar foi igual a 130 em todos os monitoramentos do método proposto.

A Figura 6(b) ilustra a imagem binária resultante do processo rea-

Figura 5 – Diagrama em blocos do processamento digital da imagem do método proposto

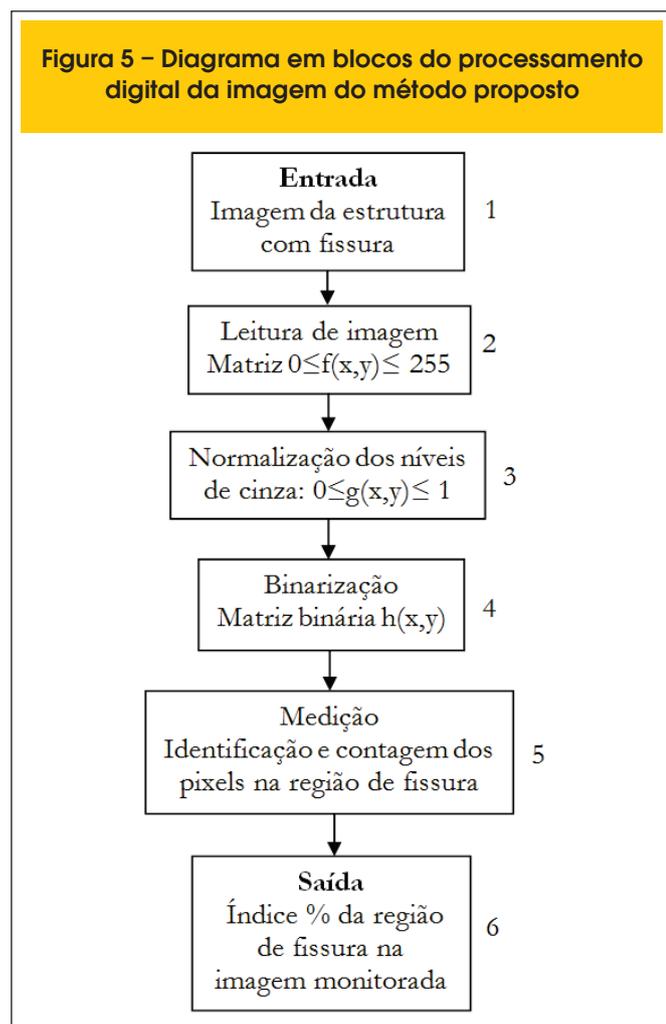
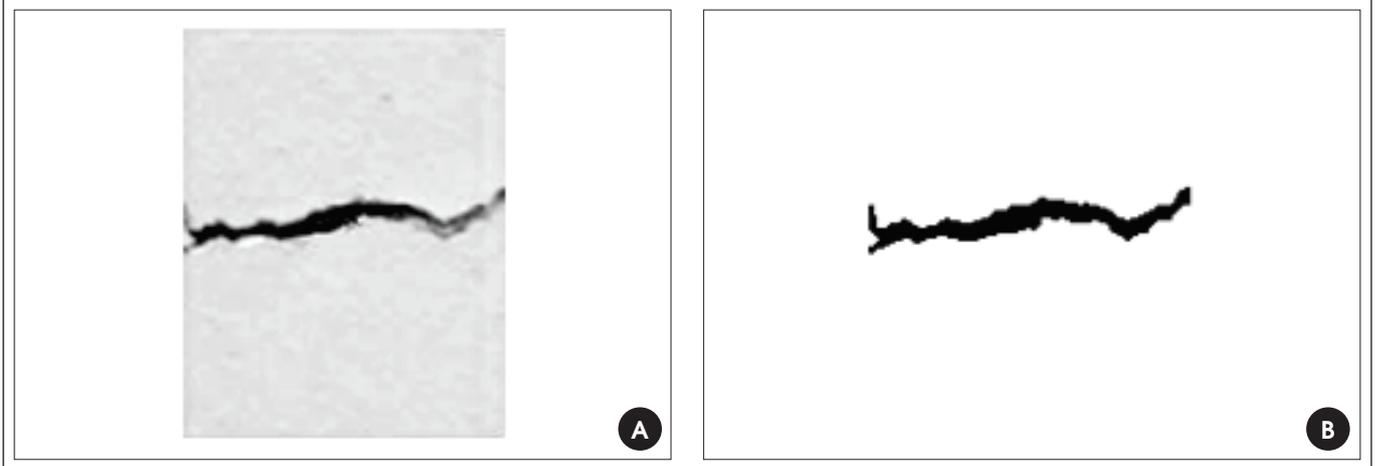


Figura 6 – (a). Imagem de fissura em alvenaria representada em escala de cinza com 256 níveis de cinza. 6(b). Imagem após processo de binarização



lizado pelo bloco 4. A medição da quantidade de pixels é realizada pelo bloco 5 (Figura 5) que implementa a equação 3.

$$Q = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} n^p m^q \quad (3)$$

Onde M e N representam a quantidade de linhas e colunas na imagem, e Q representa a quantidade de pixels de interesse na imagem.

Finalmente, o bloco 6 da Figura 5 calcula a % da região ocupada de fissura na imagem de entrada. Essa % é obtida na comparação entre a quantidade de pixels de fissura a quantidade de pixels total da imagem. Essa comparação de pixels é realizada independente a abertura, comprimento e índice (quantidade) das fissuras encontradas na imagem de entrada.

A informação de saída do algoritmo de processamento, que corresponde à % de ocupação de fissura na estrutura em alvenaria é exibida diretamente na tela do aparelho celular.

5. Resultados e discussões

A avaliação do desempenho e da eficiência do sistema proposto foi conduzida por meio de comparações entre medições registradas pelo aparelho celular e aquelas provenientes do método convencional, em diferentes aberturas de fissuras. As comparações entre o método proposto e o convencional foram realizadas em corpo de prova de concreto em formato padrão, numa máquina de ensaio de compressão. O método proposto pode ser aplicado em estruturas em alvenaria e também em concreto. O objetivo do experimento com corpo de prova e máquina de ensaio foi obter fissuras para análise dimensional de maneira mais rápida, comparado com a coleta nas vistorias periódicas em alvenaria.

Diferentes tipos e composições do corpo de prova podem ser utilizados, uma vez que os experimentos desconsideraram as características mecânicas do corpo de prova. A Figura 7 ilustra um

corpo de prova na máquina de ensaio de compressão.

O experimento com a máquina de ensaio foi realizado utilizando seis corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de comprimento e faces perpendiculares. A superfície a ser monitorada pelo sistema proposto (alvenaria ou concreto) é preparada, e consiste em adicionar tinta acrílica da cor branca na superfície do corpo de prova, para facilitar a posterior observação das fissuras. No experimento foram aproveitados três corpos de prova que apresentaram maiores fissuras voltadas à região frontal da máquina de ensaio. Os corpos de prova foram escolhidos visando facilitar a medição pelo método convencional e o posicionamento do sistema de aquisição, para a captura de imagem no método proposto. Após a ruptura inicial do corpo de prova, aplicou-se gradativamente um avanço do eixo de compressão da máquina de ensaio, o qual promoveu aumentos proporcionais e observáveis de fissuras no corpo de prova.

Figura 7 – Máquina de ensaio utilizada na Engenharia Civil para verificar comportamento e resistência à compressão em corpo de prova

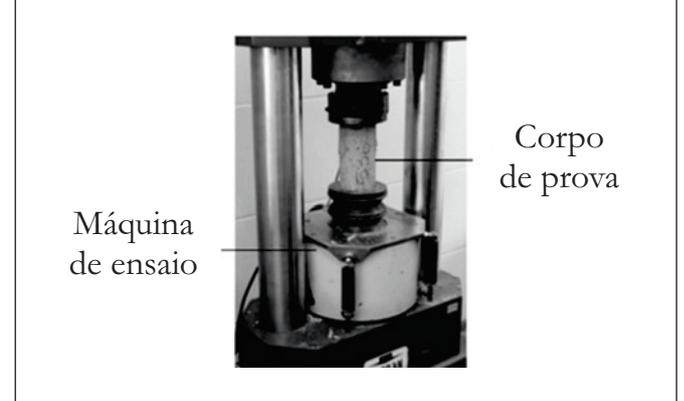
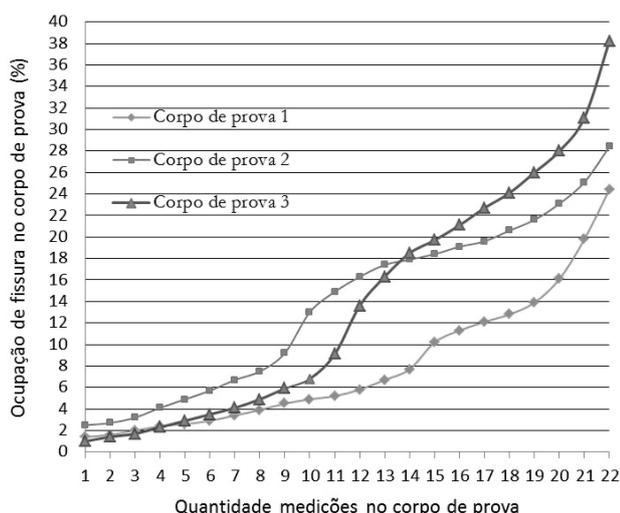


Figura 8 – Região % ocupada pelas fissuras no corpo de prova obtido no método proposto com o aparelho celular. Foram 22 medições médias em cada um dos três corpos de prova durante o experimento de comparação



As medições convencionais da abertura de fissura foram realizadas por dois técnicos, utilizando inicialmente uma escala graduada com resolução de 0,5 mm. Devido à baixa resolução desta escala, outras medições convencionais foram realizadas utilizando um paquímetro digital de 0,01 mm de resolução. No experimento de comparação foram realizadas em cada método (proposto e convencional) quatro medições, obtendo-se 22 medições médias que serão apresentadas nesta Seção. Os técnicos que realizaram o monitoramento no método convencional também utilizaram o sistema proposto nas mesmas condições e corpos de prova.

Na comparação de medição, os valores do método proposto que resultaram os gráficos a seguir, foram coletados, processados e apresentados diretamente na tela do aparelho celular ao usuário. A Figura 8 apresenta uma ilustração gráfica externa ao aparelho celular, com as taxas de aumento das aberturas de fissuras registradas pelo sistema proposto em três diferentes corpos de prova. Os valores das medições foram obtidos em 22 intervalos de aplicação de avanço do eixo de compressão da máquina de ensaio. As medições foram realizadas nos três corpos de prova após o surgimento da 1ª fissura.

As demais análises de resultados desta Seção referem-se ao corpo de prova número três. Esse corpo de prova foi escolhido devido melhor posição visual das aberturas de fissuras dispostas na máquina de ensaio, pois o corpo de prova não é retirado após o início do ensaio de compressão. Outro fator foi melhorar a comparação do método proposto contra o método convencional, devido à maior amplitude da abertura das fissuras observadas.

Para validar o método proposto, as imagens capturadas foram submetidas a um teste comparativo com o processamento off-line em PC. Nessa comparação utilizou-se o software Matlab com toolbox de processamento de imagens e algoritmo de contagem de pixels. A Figura 9 ilustra a comparação dos resultados de medição

do processamento das imagens em PC e o método proposto.

O método proposto acompanhou a medição de referência do algoritmo processado no software em PC. As diferenças entre os métodos representam um valor abaixo de 1,4 %.

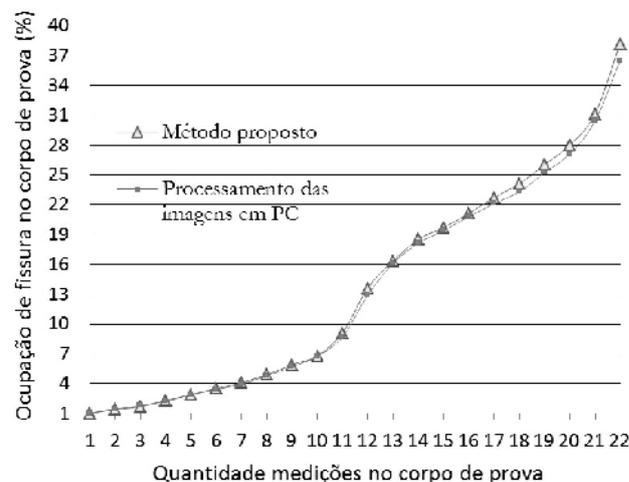
Em uma vistoria periódica, o técnico verifica o aumento ou estabilização de fissura em relação ao período entre os monitoramentos, sem a relação métrica entre a fissura em alvenaria e a imagem. Apenas é considerada a diferença de ocupação de fissura no decorrer das imagens observadas. A Figura 10 apresenta as telas reais do aparelho celular no método proposto.

A Figura 10 (c) apresenta uma imagem capturada da estrutura em alvenaria com diferentes dimensões na abertura de fissura. A Figura 10 (d) apresenta a imagem binária com o resultado total de 307200 pixels, e 16,198% de ocupação de fissura (pixels pretos) na imagem monitorada. Independente do comprimento, índice e dimensão de abertura, todas as fissuras visíveis a olho nu foram processadas pelo método proposto.

A Figura 11 apresenta uma análise comparativa entre medidas apresentadas pelo uso de uma escala graduada, um paquímetro digital e o método proposto. Devido às diferenças entre o método proposto e as medidas obtidas com o uso de uma escala graduada (9 e 34%), os valores adotados como referências no método convencional foram obtidos com um paquímetro digital, com variações de medida entre 4,2 e 4,9 %.

A mesma região do corpo de prova apresentando abertura de fissura foi utilizada em todas as medições, independente do método de medida. A utilização da escala e do paquímetro digital demandou maior tempo na obtenção da medição convencional, devido às duas medidas dos dois técnicos em cada instrumento. As medições sucessivas foram necessárias para a obtenção das correspondentes médias para cada fase de evolução das fissuras, e são ilustradas na Figura 11. No total sete fissuras foram observadas durante o período de compressão do corpo de prova na máquina de ensaio. Ao longo desse procedimento de ensaio de

Figura 9 – Comparação de medição entre as imagens no método proposto e o processamento das imagens em PC. No total foram 22 medições médias



compressão, diferenças significativas nas dimensões das aberturas de fissuras puderam ser observadas. Diferente da técnica convencional, a qual demanda cálculos extras a partir das leituras manuais, o método proposto apre-

sentou o % de ocupação das fissuras à medida que as imagens eram capturadas. A resolução de 0,5 mm da escala graduada, associada à dificuldade de visualização (leitura da escala e posicionamento na fissura) contribuiu para produzir medições com

Figura 10 – Processamento de uma imagem no aparelho celular com o sistema Windows Phone: (a) Seleção do sistema de captura de imagem a ser processada (wPhoneFissuras); (b) Seleção do sistema (tela inicial) e do limiar para o processamento da imagem a ser capturada; (c) Processamento (monitoramento) da imagem capturada; (d) Imagem binária da fissura e a apresentação do resultado dos pixels monitorados da imagem



A



B

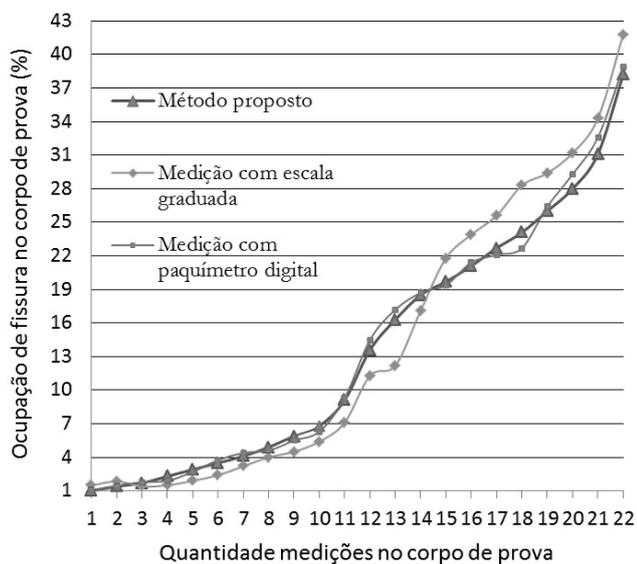


C



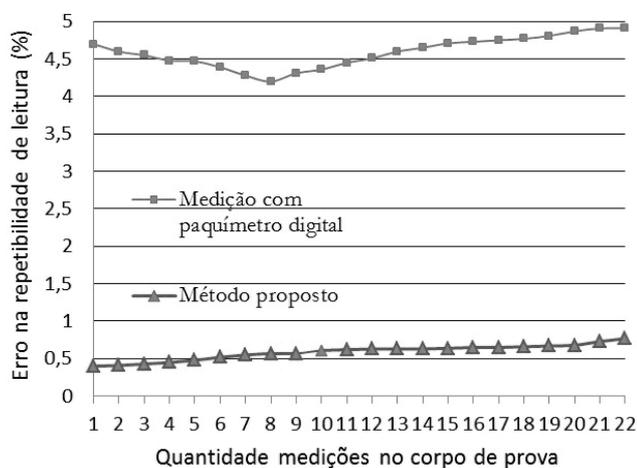
D

Figura 11 – Comparação de medição entre o método proposto, método convencional com escala graduada e paquímetro digital em 22 medições no corpo de prova



maiores erros. O paquímetro digital, por sua vez, apresentou leituras diretamente no mostrador do instrumento, com a desvantagem da necessidade de realizar o posicionamento manual sobre a fissura no corpo de prova. Os erros de repetibilidade das medições obtidas no paquímetro digital e no sistema proposto, para cada fase de abertura das fissuras são ilustrados na Figura 12.

Figura 12 – Erros de repetibilidade de medições de fissura no corpo de prova. No total, foram realizadas 22 comparações entre o paquímetro digital e o método proposto

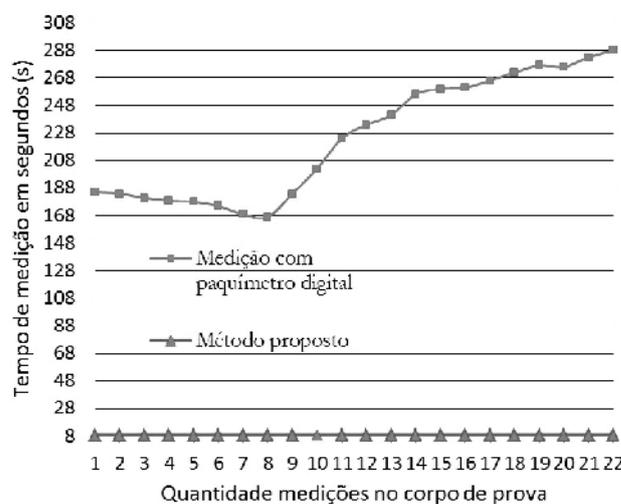


Os resultados da Figura 12 indicam que os erros na repetibilidade do paquímetro digital superaram aqueles apresentados pelo método automático independente da quantidade de medições realizadas. O paquímetro digital apresentou erro de repetibilidade entre 4,2 e 4,9 %. Em particular, esses erros foram maiores durante o início de abertura da única fissura observada, na qual as dimensões de fissura aproximam-se da resolução do paquímetro. A partir da 9ª medição com o paquímetro digital há um aumento no erro de repetibilidade devido ao maior índice de fissuras no corpo de prova avaliado. Em contrapartida, o método proposto obteve melhores resultados em razão da sua capacidade em detectar e contar menores quantidades de pixels para a mesma fase de aumento das fissuras no corpo de prova, apresentando erro de repetibilidade entre 0,42 e 0,77%.

Uma avaliação do desempenho do método proposto (Figura 13) demonstra que são necessários nove segundos para capturar e processar uma imagem com até sete fissuras no corpo de prova, contra uma média de 235 segundos para o método convencional. Essas durações correspondem a 22 medições coletadas no mesmo corpo de prova.

Observa-se na Figura 13 que o tempo demandado pela medição convencional até a 8ª medição é inversamente proporcional ao aumento da abertura da única fissura observada no corpo de prova. Também observa-se que o tempo demandado pela medição convencional entre a 9ª e 22ª medição é diretamente proporcional ao aumento do índice de fissuras identificadas no corpo de prova. A comparação de erro de repetibilidade em relação às dimensões das fissuras observadas é ilustrada na Figura 14. Nota-se que os erros apresentados pelo paquímetro digital superaram aqueles encontrados pelo método automático. Os resultados da Figura 14 indicam que, à medida que a única fissura observada aumenta em dimensão até a 8ª medição, menores são os erros registrados pelo método convencional. Esse comportamento ocorreu em razão da maior facilidade na visualização do aumento da fissura ao longo do ensaio de compressão.

Figura 13 – Tempo de medições durante 22 estágios de abertura de fissura para um total de sete fissuras observadas

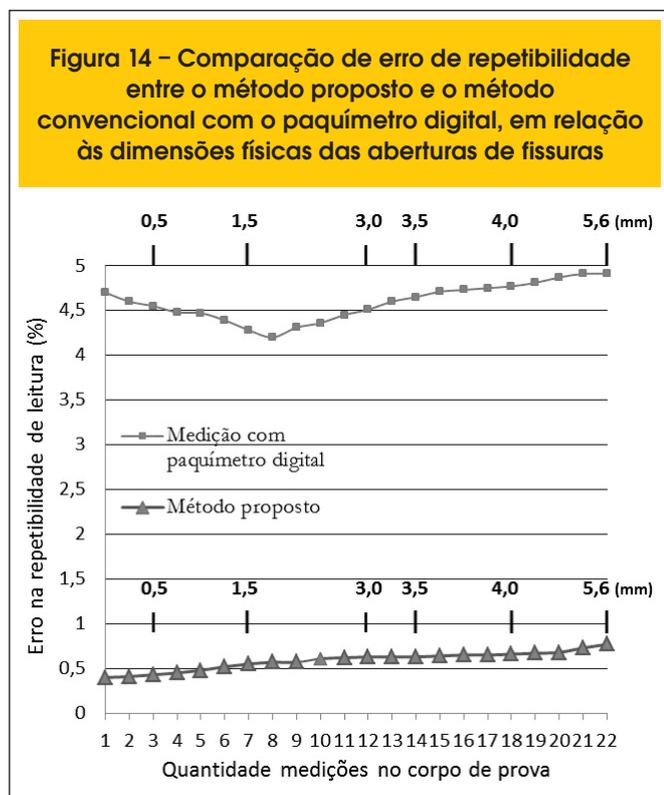


Na Figura 14 à medida que surgem novas fissuras em fase inicial, o erro se torna maior. Para esses casos, o erro do método convencional foi de 4,2% para 4,9 % entre a 9ª e a 22ª medição. Em contrapartida, o erro exibido pelo método proposto aumentou ligeiramente ao final das medições, devido à maior quantidade de pixels que as fissuras ocuparam. Todavia, essa imprecisão permaneceu abaixo de 1% durante todas as medições.

6. Conclusões

O método de monitoramento proposto neste trabalho identifica o índice % da região de fissura em alvenaria ou concreto, por meio de algoritmo de processamento de imagens em plataforma móvel. Experimento comparativo foi realizado entre o sistema de visão proposto e o método convencional de medição de abertura de fissura. Na comparação, utilizou-se o ensaio de compressão em corpo de prova, para obtenção mais rápida de diferentes dimensões de fissuras. Os resultados demonstraram que o método proposto de monitoramento dimensional de fissuras superou a técnica convencional em diversos aspectos. O sistema de visão apresentado neste trabalho, o qual utiliza um aparelho celular para aquisição de imagens e processamento, produziu os seguintes resultados:

- Menor subjetividade na identificação de alterações da região da fissura, sem depender de experiência do técnico em procedimentos de leitura e interpretação de instrumentos de metrologia;
- Resultados mais exatos e consistentes, independente do índice de fissuras encontradas e das dimensões das aberturas de fissuras observadas;
- O índice % da região das fissuras é obtido diretamente na tela do aparelho celular à medida que as imagens eram capturadas



e processadas, diferentemente do método convencional que demanda medições exaustivas e cálculos externos para a obtenção de resultados;

- O menor tempo de medição, constante e independente do comprimento, forma e índice de fissuras encontradas, representaram outro resultado atrativo;
- Com o método proposto é possível compartilhar os dados obtidos no monitoramento de fissuras por meio da comunicação móvel.

O uso de um aparelho móvel com a base suporte oferece repetibilidade no posicionamento do método proposto na análise da região de fissura. Uma vantagem da base suporte portátil (leve e pequena) é a mobilidade, especialmente interessante quando diferentes análises devem ser conduzidas em diferentes ambientes com estruturas em alvenaria.

O monitoramento de fissuras do presente trabalho também pode ser aplicado na análise do comportamento de diferentes compostos do concreto submetidos a ensaios mecânicos, com a observação da evolução das fissuras..

7. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica, tanto da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), pelo apoio técnico para a realização da presente pesquisa e experimentos.

8. Referências bibliográficas

- [01] CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, Informativo Econômico Construção Civil: Desempenho e Perspectivas, Banco de Dados, Brasília – DF, disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/files/textos/064.pdf>, Dezembro 2011, p.6.
- [02] PARK, H. S.; LEE, H. M.; ADELI, H.; Lee, I. A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 22, n. 1, 2007, p.19–30.
- [03] YAMAGUCHI, T.; HASMUTO S. Practical Image Measurement of Crack Width for Real Concrete Structure. *Electronics and Communications in Japan*, v. 92, n.10, 2009, p. 1–12.
- [04] CHEN, B.; Liu, W. Mobile agent computing paradigm for building a flexible structural health monitoring sensor network, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, v. 25, n.7, p. 504–16.
- [05] GUDMUNDSSON, H.; CHATTERJI, S.; JENSEN, A. D.; THULOW, N.; CHRISTENSEN, P. The Measurement of paste content in hardened concrete using automatic image analyzing technique, *Concrete Research*. 1979, v.9, p. 607–612.
- [06] KASEKO, M.S.; LO, Z.P.; RITCHIE, S.G. Comparison of traditional and Neural Classifier for Pavement-Crack Detection, *Journal of Transportation Engineering – ASCE*, 1994, v.120, n.4, p. 552–569.
- [07] ISSA, M.A.; HAMMAD, A.M. Assessment and Evaluation of Fractal Dimension of Concrete Fracture Surface Digitized Images. *Cement and Concrete Research*,

- 1994, v.24, n.2, p. 325–334.
- [08] TILLOTSON, H. T.; SNAITH M. S.; HUANG, Y. Detecting cracks by image analysis on a parallel computer, in Proceedings of the International Computing Congress, ASCE, Boston, 1998, p.11–23.
- [09] CHEN, L. C.; JAN, H. H.; HAUNG C. W. Mensuration of Concrete Cracks Using Digital Close-range Photographs, in Proceedings of the 22th Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, 2001, p.1248–1253.
- [10] DARE, P.M.; HANLEY, H. B.; FRASER, C.S.; RIEDEL, B.; NIEMEIER W. An Operational Application of Automatic Feature Extraction The Measurement of Cracks in Concrete Structures. Photogrammetric Record, 2002, v.99, n.17, p.453–464.
- [11] AMMOUCHE, A.; RISS, J.; BREYSSE, D.; MARCH AND, J. Image analysis for the automated study of microcracks in concrete, Cement and Concrete Composites, 2001, v.23, p.267–278.
- [12] SCHUTTER, G. D. Advanced monitoring of cracked structures using video microscope and automated image analysis. NDT&E International, 2002, v.35, p.209–212.
- [13] QADER, A.L.; ABUDAYYEH, O.; KELLY, M.E. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges, Journal of Computing In Civil Engineering, v. 17, n. 4, p. 255–263, 2003.
- [14] SOHN, H.G.; Lim, Y.M.; YUM, K.H.; KIM, G.H. Monitoring Crack Changes in Concrete Structures, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005, v.20 p.52–61.
- [15] SINHA, S. K.; FIEGUTH P. W. Automated detection of cracks in buried concrete pipe images. Automation in Construction, 2006, v.15 p.58–72.
- [16] LECOMPTE, D.; VANTOMME, J.; SOL, H. Crack Detection in a Concrete Beam using Two Different Camera Techniques, Structural Health Monitoring, 2006, v.5, p.59–68.
- [17] YAMAGUCHI, T.; NAKAMURA, S.; SAEGUSA, R.; HASHIMOTO, S. Image-based Crack Detection for Real Concrete Surfaces, IEEJ Transactions On Electrical and Electronic Engineering, 2008, v.3, n.1, p.128–135.
- [18] BERNSTONE, C.; HEYDEN, A. Image analysis for monitoring of crack growth in hydropower concrete structures, Measurement, 2009, v.42, p.878–893.
- [19] SHAM, F. C.; XU, W. T.; LO, T. Application of flash thermography for crack identification in concrete materials, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2010, v.52, n.9, p.494–497.
- [20] FUJITA, Y.; HAMAMOTO, Y. A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces, Machine Vision and Applications, 2011, v.22, p.245–254.
- [21] BARAZZETTI, L.; SCAIONI, M. Crack Measurement: Development, Testing and Applications of an Automatic Image-Based Algorithm, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Lecco, Italy, 2009, p.285–296.
- [22] BARAZZETTI, L.; SCAIONI, M. Development and Implementation of Image-based Algorithms for Measurement of Deformations in Material Testing, Sensors, 2010, v.10, p.7469-7495.
- [23] AVAK, R.; SCHWUCHOW R.; MARCEL, F. Concrete-crack monitoring using digital image processing techniques, Bautechnik, 2007, v.84, n.6, p.403-408.
- [24] GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. Digital Image Processing. Prentice Hall, 2 ed. New Jersey, 2002.