

Geração de mapas de danos de fachadas de edifícios por processamento digital de imagens capturadas por Vant e uso de fotogrametria digital

Generating of damage maps of building façades through digital image processing captured by drones and use of digital photogrammetry

Carlos Mariano Melo Júnior
Francisco Evangelista Junior
Lenildo Santos da Silva
Antônio Alberto Nepomuceno

Resumo

O objetivo deste trabalho foi aplicar uma metodologia para geração automática de mapas de danos em ortoimagens de fachadas de edifícios, utilizando-se veículo aéreo não tripulado (Vant) para a captura das fotografias. A geração de mapas de danos visa auxiliar na inspeção visual, método empregado nas atividades de recuperação, manutenção ou intervenção em edifícios. Utilizando a técnica de *dense stereo matching* (DSM), modelos geométricos de edifícios foram gerados por nuvem de pontos no programa PhotoScan para a obtenção de ortoimagens. Após essa etapa, as ortoimagens foram submetidas à etapa de geração de mapas de danos de manchas escuras no Programa Tyche (2015), que mapeou e quantificou percentualmente essas manifestações patológicas. Os resultados dos mapas de danos foram classificados também qualitativamente. A aplicação de Vant demonstrou ser uma ferramenta eficiente para a atividade de inspeção de fachadas e para a captura de imagens a serem utilizadas por meio da técnica DSM. A geração de mapas de danos pelo Tyche (2015) demonstrou ser também eficaz, no entanto a interação do usuário mostrou-se importante para alcançar os resultados esperados.

Palavras-chave: Mapas de danos de fachadas. *Dense stereo matching*. Processamento digital de imagens.

Abstract

The aim of this study was to apply a methodology for automatic generation of maps of damages in orthoimages of façades, using UAVs to capture the photographs. The generation of maps of damages aimed to assist in the visual inspection method used in activities of maintenance, restoration or intervention in buildings. Using the dense stereo matching (DSM) method, geometric models of buildings were generated by the point cloud in the PhotoScan program for obtaining orthoimages. After this step, the orthoimages were submitted to generation of maps of damages of staining in Tyche (2015) software, which mapped and quantified in percentage terms these defects. The results of the maps of damage were also classified qualitatively. The application of UAV proved to be an efficient tool for façade inspection activity and for capturing images to be used by DSM. The generation of maps of damages by Tyche (2015) proved also effective, however it was verified that the user interaction was important to achieve the expected results.

Keywords: *Maps of damages of façades. Dense stereo matching. Digital image processing.*

Carlos Mariano Melo Júnior
Instituto Federal de Sergipe
Estância - SE - Brasil

Francisco Evangelista Junior
Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

Lenildo Santos da Silva
Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

Antônio Alberto Nepomuceno
Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

Recebido em 13/03/17
Aceito em 21/06/17

Introdução

A evolução da ciência da computação e, principalmente, no campo da visão computacional, tem possibilitado o desenvolvimento de pesquisas voltadas à extração de atributos, ou seja, reconhecimento e classificação de características ou padrões de uma cena. Trabalhos têm visado a aplicação de ferramentas da visão computacional para obtenção de informações sobre danos em fachadas de edifícios históricos para apoio ao planejamento de obras de restauro (RUIZ; LERNA; GIMENO, 2002).

Em outro segmento da visão computacional, encontra-se a correspondência estéreo (*stereo matching*). Essa técnica permite que, por meio de duas ou mais fotografias, modelos geométricos de objetos possam ser criados mediante a identificação de conjunto de píxeis correspondentes, convertendo suas posições bidimensionais em posições tridimensionais (SZELISKI, 2010). Atualmente, essa técnica é usada no segmento da fotogrametria digital, favorecendo-se também dos avanços tecnológicos.

A obtenção de nuvem de pontos pelos princípios da fotogrametria e da correspondência estéreo permite a criação de modelos geométricos de edificações, e estudos têm ressaltado a grande qualidade dos produtos fotogramétricos sob condições apropriadas de iluminação e outros aspectos (KOUTSOUDIS *et al.*, 2012).

Paralelamente a essa temática, as intervenções em edificações visando o restabelecimento de requisitos mínimos de desempenho fazem-se relevantes para garantir segurança e outros aspectos, como a qualidade estética. O levantamento cadastral é um instrumento necessário e inicial para a realização de ações e define-se como o processo de medição e registro das dimensões e formas do edifício com a finalidade de sua representação gráfica. A representação em escala é denominada forma real, que se apresenta ainda em forma teórica e efetiva. A forma teórica é concebida pela arquitetura, ou seja, ainda na fase de projeto, enquanto a forma efetiva busca representar o atual estado do edifício, com suas irregularidades, deformações ou manifestações patológicas (FORAMITTI, 1973).

A fotogrametria permite representar por meio dos produtos fotogramétricos, como as ortoimagens ou ortofotos, a forma real efetiva das fachadas de um edifício. As ortoimagens são as representações de fachadas por projeção ortográfica. Torna-se também a forma real efetiva porque o modo de geração é por meio de fotografias capturadas. As ortoimagens permitem registrar as propriedades

físicas dos materiais empregados na construção, as cores, as deformações, os danos, as manifestações patológicas, enfim, representar o estado de conservação da fachada no instante da tomada fotográfica.

O objetivo deste artigo é demonstrar a aplicação de métodos automatizados para geração de mapas de danos de fachadas a partir das nuvens de pontos obtidas pelo processamento digital de imagens. Por fim, destaca-se que este trabalho também possui o propósito de aplicar métodos para a inspeção visual pela utilização de Vant na tomada das fotografias.

Revisão bibliográfica

Nesta seção, será apresentada uma breve revisão sobre fotogrametria digital, com foco na obtenção de modelos por nuvem de pontos, e processamento digital de imagens visando a extração de informações por métodos automáticos.

Fotogrametria digital

A fotogrametria digital, fase atual da fotogrametria, possui a simplificação dos processos como um dos princípios devido ao alto grau de automação e a redução dos custos pela não necessidade de instrumentos fotogramétricos, pois estes foram substituídos por computadores (AMORIM, 2012).

Os tipos de processamento da fotogrametria digital são: manual, semiautomático e automático (GROETELAARS, 2004). O processamento automático, tecnologia surgida recentemente, fundamenta-se na construção de modelos a partir da geração de nuvens de pontos por processamento digital de imagens e princípios da fotogrametria. Vários são os termos utilizados para designar essa tecnologia e que têm como finalidade a obtenção da geometria de objetos e cenas a partir de imagens 2D (DONEUS *et al.*, 2011). Dentre os termos, são comumente utilizados: *photo-based scanning* (digitalização tridimensional baseada em fotografias), *dense surface modeling* (modelagem densa de superfície); e *dense stereo matching* (DSM) (densa correspondência estéreo) (WALFORD, 2009; TANG; WU; CHEN, 2002; GROETELAARS; AMORIM, 2012; LI *et al.*, 2013). Neste trabalho, será empregado o termo DSM.

Processamento para obtenção de modelos por DSM

Os produtos fotogramétricos de cenas ou objetos são resultantes das seguintes etapas de processamento: *stereo matching* ou

correspondência estéreo (nuvem de pontos esparsa), nuvem de pontos densa e construção da malha (*mesh*).

Tang *et al.* (2002) inferem que *stereo matching* é o processo de encontrar pontos correspondentes (*smart matches*) em duas ou mais imagens e, atualmente, é um dos grandes desafios da ciência computacional no seguimento da visão computacional. Tavani *et al.* (2014) explicam que a reconstrução em 3D é possível desde que existam pelo menos duas imagens da mesma cena obtidas de posições diferentes, isto é, de centros de projeções distintos e que, conhecendo a posição, a orientação e a distância focal, é possível encontrar a posição de um ponto no espaço a partir das coordenadas bidimensionais das imagens pelo princípio da geometria epipolar.

Além de ser necessária a sobreposição das fotografias, é importante que as superfícies apresentem texturas aleatórias, ou seja, sem padrões repetitivos ou coloração uniforme (como um grande plano de fachada pintado de branco). Os padrões repetitivos ou com baixa textura dificultam a busca por pontos correspondentes em fotografias, assim como as superfícies espelhadas também não são favoráveis, pois refletem quaisquer padrões do seu entorno, fazendo com que um padrão possa aparecer em uma imagem e não aparecer em outra imagem. O resultado final da correspondência de pontos automática é uma nuvem de pontos esparsa ou de baixa densidade, também descrita por Koutsoudis *et al.* (2014) como nuvem de pontos parcial ou dados brutos, que define a geometria do objeto.

Após a etapa de construção da nuvem de pontos esparsa, há a transformação desses dados em uma nuvem de pontos densa, em que, de acordo com Verhoeven (2011), a maioria dos detalhes geométricos do objeto é construída.

De acordo com Koutsoudis *et al.* (2014), a transformação de dados de nuvem de pontos em malhas (*mesh*) é um procedimento de agrupamento de vértices da nuvem, ou seja, as malhas são

superfícies obtidas por modelos de pontos e operações de modelagem. *Mesh* é a forma mais comum para representar um modelo de superfície, que se caracteriza por um arranjo espacial de polígonos adjacentes, compartilhando arestas da superfície de fronteira do objeto.

Ortorretificação

A ortorretificação digital é o processo realizado por algoritmos computacionais que reposicionam cada pixel da imagem de acordo com a projeção ortogonal de cada um deles, gerando a ortoimagem digital a partir dos modelos geométricos. As coordenadas do espaço-objeto (X, Y, Z), que fazem parte do modelo digital, são transformadas em coordenadas do espaço-imagem (X, Y) a partir de equações de colinearidade.

Para a exportação da ortoimagem, a orientação externa absoluta faz-se necessária, sendo esta a correção da escala do modelo para a escala natural e da rotação do modelo nos eixos X, Y e Z, a partir de dimensões tomadas sobre o objeto real e dos eixos cartesianos do modelo.

A Figura 1(c) apresenta a ortoimagem de uma edificação do estudo realizado por Groetelaars (2004). O tipo de processamento usado neste estudo foi o manual, com a identificação de pontos homólogos, pois no período em que a pesquisa foi realizada não havia ainda o método por DSM.

Tomadas fotográficas para o processamento automático de imagens digitais

Um dos aspectos do posicionamento da câmera para as tomadas fotográficas é o paralelismo entre suas posições e a perpendicularidade ao plano do objeto de interesse, como demonstrado na Figura 2, e que cada parte do objeto seja fotografada pelo menos em três posições diferentes, garantindo a sobreposição das imagens (GROETELAARS; AMORIM, 2012). Esses aspectos são importantes para maximizar os procedimentos referentes às correlações automáticas da técnica DSM.

Figura 1 - Capela de Nossa Senhora da Escada



(a) Fotografia da fachada frontal



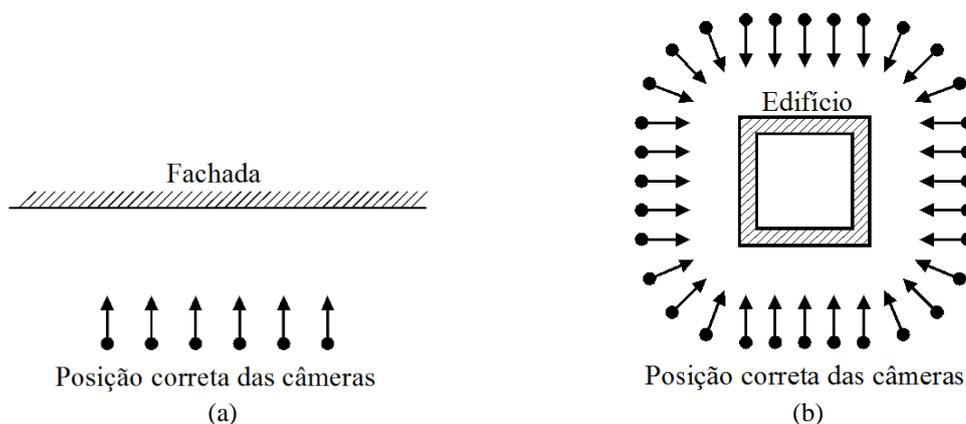
(b) Modelo geométrico



(c) Ortoimagem

Fonte: Groetelaars (2004).

Figura 2 - (a) Posicionamento correto para aquisição de fotografias de fachadas; e (b) Posicionamento correto para aquisição de fotografias em torno de um edifício



Fonte: Agisoft (2014).

De acordo com Pierrot-Deseilligny, De Luca e Remondino (2011), deve-se garantir a sobreposição mínima de 80% de uma fotografia para a seguinte, a fim de se assegurar a detecção automática dos pontos homólogos (pontos correspondentes). Uma forma de se alcançar a sobreposição necessária é por meio da relação da Equação 1 (BRITO; GROETELAARS; AMORIM, 2012).

$$R = \frac{B}{L} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

R = intervalo de $0,1 < R < 0,5$;

B = distância entre a posição das estações na tomada fotográfica (m); e

L = distância das estações para o objeto fotografado (m).

Essa relação é a maneira mais simples de assegurar a precisão geométrica do produto e de não haver grandes variações entre os conjuntos de píxeis a serem comparados no processamento fotogramétrico.

Pela fotogrametria terrestre (quando a câmera está posicionada próxima à superfície terrestre), só é possível fotografar, com o eixo da câmera perpendicularmente à fachada de uma edificação, os primeiros pavimentos em uma edificação alta. Para atender princípios da técnica DSM, faz-se necessária a sobreposição das imagens no sentido vertical, com fotografias tomadas perpendicularmente ao plano da fachada. Uma das alternativas para esses casos seria o acesso a edificações vizinhas ou próximas para fazer o registro fotográfico, porém isso nem sempre é possível. Entretanto, Reich, Wiggenhagen e Muhle (2012) explicam que a utilização de Vant possibilita a captura de uma cena de muitas perspectivas distintas,

tornando um excelente recurso para obtenção de fotografias a serem utilizadas para a geração de modelos fotogramétricos de edifícios altos.

Cálculo do número de fotos

O cálculo do número estimado de fotos é realizado com base na sobreposição longitudinal e lateral, objetivando determinar o número total de fotos necessárias para a restituição fotogramétrica adequada.

Nesse trabalho, a área de cobertura única (sem sobreposição) das fotografias aéreas correspondeu ao produto da dimensão representativa de 20% do lado da foto no sentido longitudinal e 60% do lado da foto no sentido lateral, valores referentes à subtração entre a área real (100%) e a área de sobreposição longitudinal (80%) e de sobreposição lateral (40%), respectivamente. Dessa forma, a $\text{Área}_{\text{única}}$ foi calculada pelo produto da dimensão representativa (12%) pela área da foto ($\text{Área}_{\text{foto}}$), apresentada na Equação 2.

$$\text{Área}_{\text{única}} = 12\% \cdot \text{Área}_{\text{foto}} \quad \text{Eq. 2}$$

Para se chegar ao valor da $\text{Área}_{\text{foto}}$, aplica-se, inicialmente, a Equação 3 para obter a dimensão da base e da altura alcançada na fotografia a uma distância d e, posteriormente, multiplicou-se a base pela altura.

$$z = (\tan \alpha/2) \cdot 2d \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

z = dimensão da base e altura na imagem (m);

α = ângulo horizontal e vertical da abertura da lente da câmera (graus); e

d = distância da câmera ao objeto ou cena (m).

Para se obter a estimativa da quantidade de fotos (N°_{fotos}) necessárias para cobrir uma determinada área, divide-se o valor da área de interesse pelo valor da $\text{Área}_{\text{única}}$ da foto, conforme Equação 4.

$$N^{\circ}_{\text{fotos}} = \frac{\text{Área}}{\text{Área}_{\text{única}}} \quad \text{Eq. 4}$$

Processamento Digital de Imagens (PDI)

A visão computacional tem a finalidade de auxiliar na resolução de problemas complexos, imitando a cognição humana e a habilidade do ser humano em tomar decisões conforme as informações presentes em uma imagem (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). Gonzalez e Wood (2010) acreditam em um ponto lógico de sobreposição entre o processamento digital de imagens e a análise de imagens, que é a área de reconhecimento de regiões ou objetos individuais em uma imagem. Pelos mesmos autores, não existem limites claros entre o processamento digital de imagens e a visão computacional. O campo do processamento digital de imagens (PDI) remete-se ao tratamento de imagens digitais por meio de computadores, assim como ao conjunto de técnicas para a manipulação de imagens digitais com o objetivo de facilitar a extração de informações desejadas.

Desse modo, compreende-se que processamento digital de imagens pertence à ciência da visão computacional, como descrito por Szeliski (2010). As etapas de processamento digital de imagens envolvem sequências de procedimentos descritos, sucintamente, a seguir.

Aquisição de imagens

Na etapa de aquisição de imagens, as informações visuais da cena são convertidas em sinais elétricos por meio de dispositivos ou sensores óticos. As câmeras possuem resolução espacial e profundidade de pixel fixas, e a quantização realiza o mapeamento do sinal contínuo da cena em um número discreto organizado espacialmente (pixel) e com capacidade finita de representação (profundidade de pixel) (SOLOMON; BRECKON, 2013).

Pré-processamento

O pré-processamento tem o objetivo de tratar os dados brutos, transformando a radiometria da imagem, corrigindo as distorções geométricas, atenuando os efeitos da atmosfera ou removendo os ruídos. Assim, a imagem obtida passa por técnicas de processamento digital com a finalidade de adequar a sua qualidade que pode ser afetada por ruídos ou pouca definição de detalhes ou, ainda,

realçar detalhes com algum interesse específico, preparando para as próximas etapas.

As técnicas de realce de imagens são aplicadas com a função de atribuir características que permitam ao usuário obter informações visuais com clareza, isto é, facilitar a interpretação humana e também do computador. A aplicação de realce é subjetiva, pois dependerá da informação que se deseja extrair da imagem e da existência dessa informação, para que possa ser acentuada (SOLOMON; BRECKON, 2013).

Algumas das técnicas adotadas para tornar uma imagem adequada às necessidades do usuário são: manipulação de brilho e contraste, e filtragens para realce de características de interesse ou remoção de ruídos e outros problemas gerados na aquisição de imagens.

Segmentação

O processo de segmentação consiste em subdividir uma imagem em uma ou mais distintas regiões como partes independentes, ou seja, subdividir em regiões que satisfaçam um critério de uniformidade. De acordo com Solomon e Breckon e Esquef, Albuquerque e Albuquerque (2013), a segmentação completamente autônoma é uma das etapas mais complexas do sistema de visão computacional e continua a ser um desafio no campo de pesquisa em processamento de imagens.

Além da difícil tarefa, a segmentação é, muitas vezes, a primeira etapa que deve ser concluída antes de tarefas subsequentes, como: extração de características e classificação. Conforme Esquef, Albuquerque e Albuquerque (2003), a segmentação é um processo empírico que busca se adequar às características de cada imagem e às informações que se deseja extrair.

Existem alguns métodos de segmentação baseados em princípios, citando-se: limiarização de histogramas ou binarização, textura e detecção de bordas. No entanto, as técnicas de segmentação utilizam duas abordagens principais: a similaridade entre os pixels e a sua descontinuidade ou, de acordo com Solomon e Breckon (2013), métodos baseados em similaridade e contorno ou fronteira, respectivamente.

Esquef, Albuquerque e Albuquerque (2003) afirmam que a técnica de similaridade mais utilizada é a limiarização ou aplicação de limiar de intensidade, em que é utilizada quando as amplitudes de níveis de cinza são suficientes para caracterizar um objeto e a saída do sistema é uma imagem com dois níveis de luminância: branco e preto. A abordagem baseada no método de contorno procura determinar mudanças abruptas, isto é,

grandes diferenças entre grupos de píxeis. A técnica de segmentação baseada em descontinuidades mais utilizadas é a detecção de bordas.

A limiarização na etapa de segmentação baseia-se na atribuição de valor (limiar) para a separação de píxeis na diferença dos níveis de cinza que compõem diferentes objetos de uma imagem. Assim, píxeis cujos valores excedam o limiar são alocados em uma determinada região e os píxeis que não excedem o limiar são reservados em outra região.

De acordo com Solomon e Breckon (2013), a aplicação de limiar cria uma imagem binária $b(x,y)$ a partir de uma imagem de intensidade $I(x,y)$, pela lógica matemática apresentada a seguir (Eq. 5):

$$b(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{se } I(x,y) > T \\ 0 & \text{para todos os outros valores de } I(x,y) \end{cases} \text{Eq. 5}$$

Onde T é o valor de limiar.

A forma mais comum de se atribuir valores à variável T é por meio de valor estatístico.

Pós-processamento

A etapa de pós-processamento visa melhorar o resultado obtido na segmentação, em que os defeitos e as imperfeições podem ser corrigidos. Esquef, Albuquerque e Albuquerque (2003) explicam que esses problemas são corrigidos por meio de técnicas de morfologia matemática que aplicam uma sequência de filtros morfológicos e realizam uma análise quantitativa dos píxeis da imagem.

Extração de atributos

A extração de atributos é a etapa do processamento em que se extraem as informações numéricas desejadas das imagens, como: tamanho, forma, posição e outras, ou seja, informações quantitativas de interesse ou que são fundamentais para diferenciar uma classe de objetos de outros objetos, tais como área de determinada patologia ou o comprimento de fissuras, por exemplo.

Reconhecimento e classificação

A etapa de reconhecimento tem a finalidade de realizar de forma automática a identificação de objetos que foram segmentados na etapa anterior (ESQUEF; ALBUQUERQUE; ALBUQUERQUE, 2003). Segundo Solomon e Breckon (2013), a classificação tem o objetivo de identificar propriedades e padrões, acomodando-os em uma classe específica.

Método

Nesta seção, serão apresentados os métodos empregados para a geração de modelos por DSM e geração de mapas de danos por PDI.

Geração de modelos por DSM

A geração de modelos por DSM envolveu a etapa de planejamento, tomada fotográfica e processamento, descritos a seguir.

Planejamento

A etapa do planejamento deve ser direcionada pela finalidade do levantamento, tipo de processamento, características das edificações e pelas informações que se pretendem extrair dos produtos gerados.

Por se tratar da técnica de obtenção de modelos de nuvem de pontos por fotografias (DSM), as imagens das fachadas foram capturadas com a câmera posicionada perpendicularmente ao plano externo do edifício e, dessa forma, para as edificações altas fez-se imprescindível o uso de Vant. Por meio desse veículo, também foi possível realizar os registros fotográficos com maior proximidade, o que levou a um aumento da visualização dos detalhes e manifestações patológicas nas fachadas pela maior resolução final da imagem.

Nessa etapa, foi importante analisar o entorno do edifício, porque obstáculos (vegetação, fiações elétricas e outras edificações) poderiam limitar ou impossibilitar os voos e registros fotográficos.

Tomada fotográfica

Os equipamentos utilizados para a obtenção das imagens foram: câmera fotográfica compacta e Vant de asa rotativa, mais especificamente um multirroto quadricóptero.

Câmeras compactas são apropriadas para serem embarcadas em micro e mini Vants e a câmera empregada nesta pesquisa está apresentada no Quadro 1 com as suas especificações.

O tipo de exposição adotada nos experimentos foi o manual e os valores dos parâmetros foram importantes para assegurar que as imagens garantissem profundidade de campo aceitável e minimizassem o fenômeno de difração que pode ser gerado pelas lentes da objetiva. Assim, para cada experimento e em função das características da fachada e da luminosidade natural, os parâmetros foram ajustados, destacando-se:

(a) distância focal: importante para determinar o ângulo de visão de uma objetiva quando se

fotografa um objeto focalizado sobre uma dada mídia;

(b) abertura do diafragma ou escala de número f: capacidade de captura de luz da lente através da abertura. Quanto maiores os valores da escala f, melhor a profundidade de campo. Dessa maneira, buscou-se utilizar valores maiores para f nas câmeras embarcadas nos Vants, entre 2,8 e 7,1;

(c) tempo de exposição: o obturador controla o tempo de exposição ao qual o CCD está exposto à luz. Para maior abertura do diafragma, deve-se configurar menor tempo de exposição, ou seja, velocidades mais altas. A captura de imagens aéreas naturalmente exige maiores velocidades, tais como: 1/800, 1/1.000, 1/1.250 e 1/1.600; e

(d) sensibilidade ISO: define a sensibilidade do sensor, significando que quanto menor esse número, menor a sensibilidade. Importante lembrar que para valores baixos de ISO, pouca luz é captada; no entanto, quase não apresenta ruído e os contornos ficam mais nítidos. Utilizou-se nesta pesquisa tipicamente ISO 125, 200 e 400.

Estabelecida a distância entre a câmera e a fachada do edifício, chegou-se ao valor da distância entre as posições das tomadas das fotografias por meio da Equação 1 para se garantir a sobreposição.

O Vant utilizado possui sistema de controle e estabilização automáticos, motorização elétrica com uso de baterias de lítio, fixação da posição de aquisição das imagens com uso de bússola eletrônica e coordenadas obtidas por GPS (Figura 3). A vantagem do emprego específico do Vant multirrotor é a possibilidade de voos paralelamente ao plano das fachadas.

Processamento

O processamento para a obtenção dos modelos de superfície foi realizado no programa PhotoScan da Agisoft LLC. O computador utilizado para processamento das imagens possui a seguinte configuração: processador Intel (R) Core (TM) i7-4770 CPU 3,40 GHz, 32 GB de memória instalada (RAM) e sistema operacional de 64 bits.

A orientação interna é o processo de reconstrução do sistema perspectivo da câmara. A reconstrução é baseada na estimativa dos parâmetros internos que descrevem a geometria interna da câmara, que consiste em: distância focal (f), localização do ponto principal (PP), dimensões do sensor, distorções radiais e tangenciais. O programa PhotoScan realiza a orientação interna ou calibração (obtenção dos parâmetros métricos da câmara) de maneira automática.

Quadro 1 - Câmeras fotográficas e especificações técnicas

Especificações	Sony RX100
Resolução (píxel)	5.472 x 3.648
Píxeis efetivos (MP)	20
Sensor (mm)	13,2 x 8,8
Distância focal (mm)	28-100
Tipo de sensor	CMOS

Figura 3 - Vant multirrotor (quadricóptero) em voo e o sentido do voo



O PhotoScan possui etapas muito definidas e uma interface prática no que diz respeito à operacionalização, que segue as seguintes etapas: alinhamento de imagens e reconstrução da nuvem de pontos esparsa (*align photos*); construção da nuvem de pontos densa (*build dense cloud*); construção da malha triangular (*build mesh*); e aplicação de textura (*build texture*).

No alinhamento das imagens, podem ser definidos alguns parâmetros, como a precisão (*accuracy*), e é a etapa em que ocorre simultaneamente a construção da nuvem de pontos esparsa.

Na etapa de construção da nuvem de pontos densa, na qual a maioria dos detalhes geométricos é construída, a qualidade do modelo (*quality*) pode ser definida. Quanto maior a qualidade requerida, maior o custo computacional. No recurso avançado, a filtragem de profundidade (*depth filtering*) apresenta as opções *aggressive* e *mild*. Quando a geometria da cena a ser reconstruída é complexa, com inúmeros pequenos detalhes sobre o plano, e se deseja um processamento rápido e com poucos detalhes, é recomendado o modo *mild*.

Na etapa de construção da malha, parâmetros são apresentados no PhotoScan, destacando-se: *sourcedata* e *facecount*. Por meio da opção *sourcedata*, pode-se optar pela construção da malha a partir da nuvem de pontos esparsa ou densa, ressaltando-se que a nuvem densa possui um nível de informações maior, ou seja, geram modelos com mais detalhes. A opção *facecount* permite que se defina a quantidade de faces do modelo e esse número é baseado na quantidade de pontos da nuvem.

A aplicação de textura no PhotoScan é a etapa em que as características do material são atribuídas ao modelo e esse programa apresenta as seguintes opções: *mapping mode*, *blending mode*, *texture size/count* e *enable color correction*, em que, na opção *mapping mode*, pode-se especificar como a

textura será aplicada, tendo como opções: *generic*, *adaptive orthophoto*, *orthophoto*, *spherical*, *single photo* e *keep uv*.

Geração de mapas de danos por PDI

A geração de mapas de danos por PDI foi realizada no programa Tyche (2015). Os principais procedimentos para a classificação dos danos por esse programa são descritos a seguir.

Seleção da amostra

Para a classificação da manifestação patológica nas ortoimagens, inicialmente fez-se a seleção da amostra, reconhecida pelo usuário como o padrão de interesse. A seleção da amostra do padrão do dano classificado foi realizada de maneira empírica, ou seja, baseada na experiência.

Os padrões eram selecionados por meio da abertura de uma janela criada pelo usuário sobre a região da ortoimagem, como se pode observar na Figura 4.

Análise estatística da amostra

A análise estatística da seleção da amostra foi utilizada para determinar os píxeis a serem segmentados. O programa Tyche (2015) emprega o método de distribuição normal para segmentação dos píxeis.

Para o espaço de cores bidimensionais, como escalas de cinza, o programa utiliza a distribuição normal univariada, como ilustrado na Figura 5.

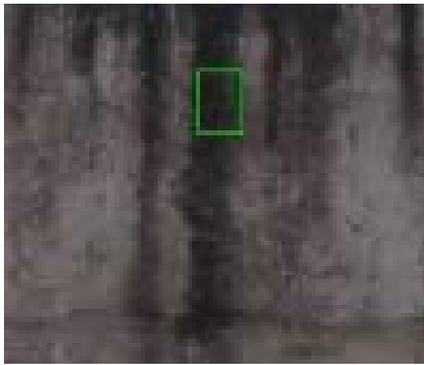
Para o espaço de cores tridimensionais, como o RGB (*truecolor*), foi utilizada a distribuição normal bivariada.

Para essas análises estatísticas, quanto maior o valor de k especificado, mais abrangente foi a classificação dos padrões em função do desvio padrão da amostra selecionada.

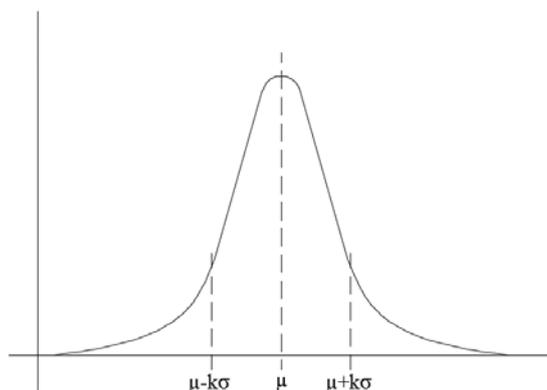
Figura 4 - (a) Fotografia de uma fachada em concreto aparente com formação de manchas escuras e a caixa de seleção; e (b) Ampliação da seleção da amostra realizada no Tyche (2015)



(a)



(b)

Figura 5 - Densidade normal univariada com média μ e variância σ^2 

Segmentação a partir da análise estatística

Para criar a subdivisão da imagem em regiões distintas pelo critério de uniformidade, o detector de bordas Canny foi utilizado para segmentar, isto é, subdividir a imagem. O valor de k definiu a abrangência da segmentação. Quanto maior o valor de k , maior foi a quantidade de píxeis segmentados, e a depender de outros parâmetros, como área mínima e máxima, maior também foi a região classificada. A segmentação foi realizada para os espaços de cores R, G, B e escalas de cinza. Ressalta-se que a análise dos píxeis foi realizada separadamente em R, G e B, mas a segmentação, assim como a classificação, foi feita sobre a imagem RGB (*truecolor*). A Figura 6 apresenta uma imagem após a etapa de segmentação, em que a cor vermelha é o padrão especificado na seleção, com base em: valores de k , seleção da amostra, espaço de cor e análise estatística.

Classificação a partir da etapa de segmentação

A etapa de classificação teve a finalidade de realizar de forma automática a identificação de objetos que foram segmentados, classificados com base no valor de k , na área e pelo espaço de cor por detector de bordas Canny.

Classificação pelo valor de k

O valor de k permitiu, inicialmente, a extração ou identificação dos padrões na etapa da segmentação, como citado no subitem anterior. A classificação foi realizada com base em toda região segmentada, desde que não fossem consideradas áreas mínimas e máximas. Assim, quanto maior o valor de k , maior era a classificação de píxeis, quando não considerada essa última sentença.

Classificação do padrão por área

Em uma das etapas da entrada de informação no

Tyche (2015), a área mínima e máxima pôde ser especificada para que, após a etapa de segmentação, somente fossem classificadas as regiões de interesse. Apesar disso, na imagem gerada para segmentação também foi possível visualizar a subdivisão do padrão identificado.

Classificação do padrão por espaço de cor

A classificação foi feita sobre cada espaço de cor gerado, levando-se em consideração a segmentação nos respectivos espaços. Para cada espaço de cor, com base nos dados estatísticos, assim como também em valores de k e área mínima e máxima (quando pertinentes), foi realizada a classificação.

Extração de atributos

Nesta etapa, foram quantificados os percentuais de classificação dos padrões em relação à área da imagem ou ortoimagem.

Resultados e discussões

Nesta seção, serão apresentados os resultados da geração dos modelos por DSM e da geração de mapas de danos por PDI. As técnicas foram utilizadas em uma das fachadas da Biblioteca Central da Universidade de Brasília (UnB), Distrito Federal (Figura 7).

Geração de modelos por DSM

Primeiramente, são apresentados os resultados da geração dos modelos pela técnica por DSM, objetivando a geração de ortoimagens.

Para o prédio da Biblioteca Central, foi utilizada a câmera Sony RX100, acoplada ao Vant, com tempo de exposição de 1/1.250 s, sensibilidade ISO-200 e escala de número f no intervalo entre $f/2,8$ e $f/7,1$, devido às variações de luminosidade durante o registro das fotografias. Foram criados dois modelos:

- (a) o modelo 1 a partir da sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 40%; e
- (b) o modelo 2 com sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 80%.

A Figura 8 apresenta uma parte da sequência das fotografias capturadas com o Vant para a geração dos dois modelos.

O modelo 1 foi gerado a partir das 65 fotos, determinadas por meio da Equação 4, e os parâmetros estabelecidos em cada etapa do PhotoScan são apresentados no Quadro 2.

Na Figura 9 estão apresentados os resultados do modelo 1: nuvem de pontos esparsa e densa, da malha triangular e do modelo de superfície com aplicação da textura.

Figura 6 - Imagem segmentada

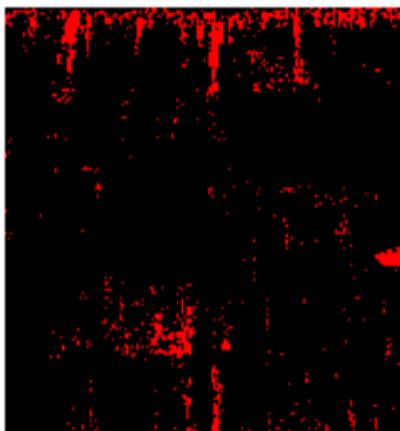


Figura 7 - Prédio da Biblioteca Central da UnB



Figura 8 - Imagens da Biblioteca Central da UnB capturadas com Vant



Quadro 2 - Modelo 1 - parâmetros utilizados no PhotoScan para a Biblioteca Central da UnB, a partir das 65 fotos

Parâmetros	Modelo 1
<i>Align Photos</i>	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	6.185 pontos
Tempo de processamento	756 s (12 min e 36 s)
<i>Build Dense Cloud</i>	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	7.008.256 pontos
Tempo de processamento	6.637 s (1 h e 50 min e 37 s)
<i>Build Mesh</i>	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Medium (467.213)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (1.401.639)</i> <i>Low (155.737)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	401 s (6 min e 41 s)
<i>Build Texture</i>	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4.000x1
Tempo de processamento	87 s (1 min e 27 s)

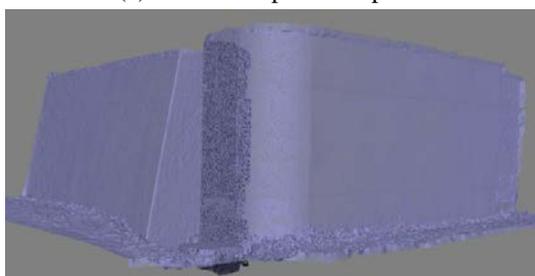
Figura 9 - Modelo 1 da Biblioteca Central da UnB gerado no programa PhotoScan, 65 fotografias



(a) Nuvem de pontos esparsa



(b) Nuvem de pontos densa



(c) Malha triangular



(d) Modelo de superfície com textura

O Quadro 3 apresenta os parâmetros empregados no modelo 2, que foi gerado a partir das 193 fotos.

A Figura 10 é o resultado do modelo geométrico do modelo 2.

A Figura 11 apresenta a ortomagem da fachada do modelo 1, gerada após a orientação externa absoluta e a etapa de exportação no PhotoScan.

Quadro 3 - Modelo 2 - parâmetros utilizados no PhotoScan para a Biblioteca Central da UnB, a partir das 193 fotos

Parâmetros	Modelo 2
<i>Align Photos</i>	
<i>Accuracy</i>	<i>Medium</i>
<i>Pair preselection</i>	<i>Disable</i>
Nuvem de pontos esparsa	6.513 pontos
Tempo de processamento	5.921 s (1 h, 38 min e 41 s)
<i>Build Dense Cloud</i>	
<i>Quality</i>	<i>Medium</i>
<i>Depth filtering</i>	<i>Mild</i>
Nuvem de pontos densa	8.851.061 pontos
Tempo de processamento	29.430 s (8 h, 10 min e 30 s)
<i>Build Mesh</i>	
<i>Surface Type</i>	<i>Arbitrary</i>
<i>Face count</i>	<i>Medium (590.063)</i>
Opções de <i>face count</i> proporcionadas pelo programa	<i>High (1.770.190)</i> <i>Low (196.687)</i> <i>Custom (200.000)</i>
Tempo de processamento	448 s (7 min e 28 s)
<i>Build Texture</i>	
<i>Mapping mode</i>	<i>Generic</i>
<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Texture size/count</i>	4.000x1
Tempo de processamento	208 s (3 min e 28 s)

Figura 10 - Modelo 2 - modelo de superfície com textura



Figura 11 - Modelo 1: ortomagem gerada de uma das fachadas da Biblioteca Central



A Figura 12 apresenta ampliações de parte da fachada das ortoimagens dos dois modelos (1 e 2), em que se pode visualizar as manchas formadas sobre a fachada.

Discussão dos resultados dos modelos por DSM

No experimento do prédio da Biblioteca Central, verificou-se que a maior quantidade de fotografias no processamento usadas no modelo 2 (valores de sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 80%) não influenciou no resultado final da ortoimagem. O tempo de processamento para obtenção da nuvem de pontos densa do modelo 2 foi quase quatro vezes maior que o modelo 1 e, mesmo assim, os resultados não se apresentaram distintos.

Geração de mapas de danos por PDI

Nesta seção, serão apresentados os resultados da geração dos mapas de danos por PDI, realizados nas ortoimagens geradas por DSM. Para os resultados em que quase todo o dano foi classificado, tendo pequenas partes de danos não classificados, foi atribuído o termo resultado satisfatório (RS); para os resultados em que todo o dano foi classificado, resultado muito satisfatório (MS); e para os resultados em que nenhum dano ou partes não relacionadas ao dano foram classificados, resultado não satisfatório (NS). Essas classificações foram atribuídas por método de análise visual, ou seja, método empírico baseado na percepção.

A ortoimagem da fachada da Biblioteca Central foi processada no programa Tyche (2015) para a detecção de manchas escuras. A ortoimagem possui uma resolução de 3.472 x 1.513 píxeis, totalizando 5.253.136 píxeis. A seleção do padrão da mancha foi feita a partir do píxel 412 no eixo x e do píxel 14 no eixo y, com uma caixa de seleção de 86 x 56

píxeis. A seleção foi feita de acordo com a percepção do usuário do padrão que se desejou classificar.

A Figura 13 apresenta as frequências de píxeis nos espaços R, G, B e escala de cinza da amostra selecionada. Percebe-se que as distribuições de frequência são muito semelhantes nos espaços R, B e escalas de cinza e um pouco diferente da distribuição no espaço G.

Os resultados da classificação nos espaços RGB e escalas de cinza são apresentados no Quadro 4, para o valor de $k = 1$, ilustrando a etapa de segmentação e classificação. Os resultados para os espaços RGB e escalas de cinza foram 6,40% e 8,31% de manchas escuras, respectivamente.

Os resultados obtidos para valor de $k = 1$ foram muito satisfatórios (MS) para os espaços RGB e escalas de cinza. A próxima classificação foi realizada com a mesma seleção da amostra, mas alterando os valores de k : 3 e 5. O Quadro 5 apresenta os resultados para os valores de $k = 3$ e $k = 5$, para o espaço de cor RGB.

Para o valor de $k = 3$, a região classificada foi de 39,37% e para $k = 5$, 80,52%. Visualmente, para esses dois valores de k , os resultados foram não satisfatórios (NS).

Discussão dos resultados de mapas de danos por PDI

Para a ortoimagem da Biblioteca Central, os histogramas das distribuições de frequência de píxeis do espaço R, G, B e escalas de cinza apresentaram menor dispersão ou menor desvio padrão. Assim, o valor de $k = 1$ apresentou uma classificação muito satisfatória (MS), pois a distribuição normal apresentou pouca dispersão. Para os valores de $k = 3$ e $k = 5$, outras partes da fachada foram classificadas.

Figura 12 - Modelo 2 - ampliação de parte da fachada dos modelos de superfície com textura

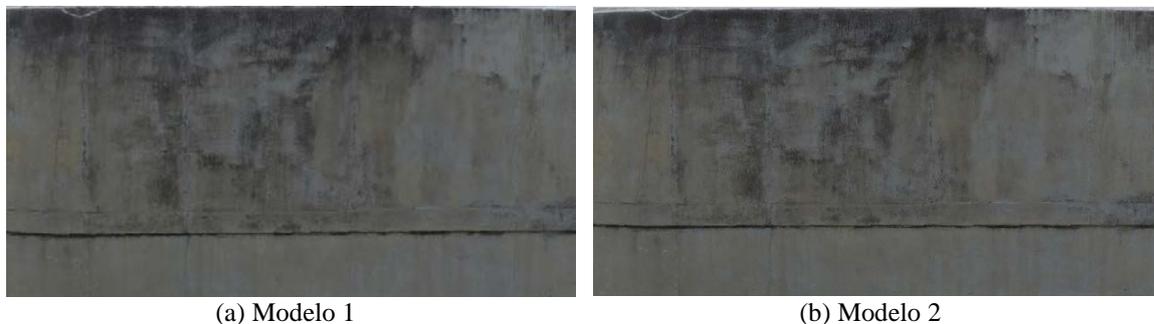
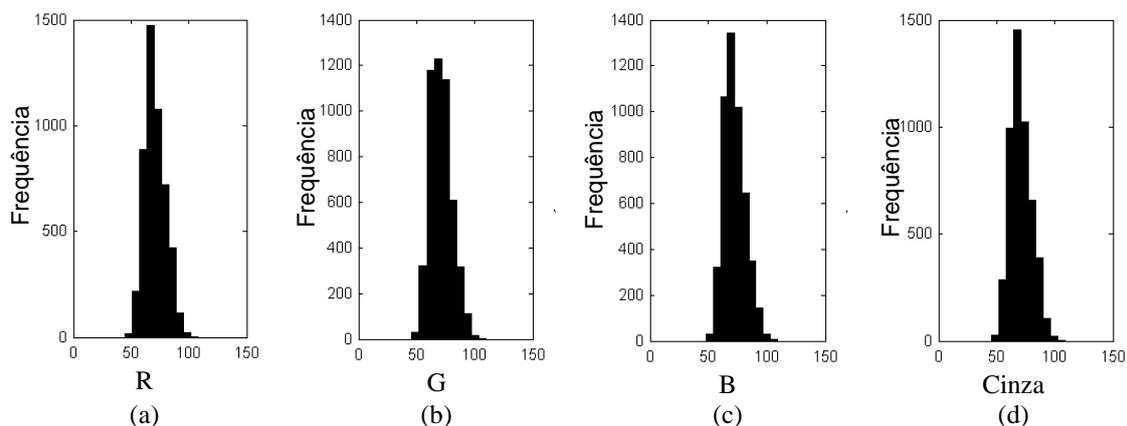


Figura 13 - Distribuições de frequência de píxeis para manchas escuras da Biblioteca Central: (a) R; (b) G; (c) B; e (d) escalas de cinza



Quadro 4 - Biblioteca Central: espaço de cores, percentual de classificação, segmentação e classificação de manchas escuras

Espaço de cores	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação
RGB	6,40		
Escalas de cinza	8,31		

Quadro 5 - Biblioteca Central: percentual de classificação de manchas escuras para $k = 3$ e $k = 5$, no espaço RGB

Valor de k	Percentual da classificação (%)	Segmentação	Classificação
3	39,37		
5	80,52		

Conclusões

A inspeção de fachadas de edifícios altos pode se tornar complexa devido à dificuldade de acesso aos últimos pavimentos. Neste trabalho, o Vant foi utilizado como equipamento eficaz no auxílio de atividades de inspeção.

A utilização do Vant foi importante para a captura de fotografias perpendicularmente ao plano da fachada, necessárias para a geração de modelos por DSM e, conseqüentemente, a obtenção de ortoimagens.

As ortoimagens foram utilizadas para a geração de mapas de danos por meio da técnica de PDI, ou seja, extração de informações de forma automática, pelas etapas, principalmente, de segmentação e classificação. Os espaços de cores RGB e escalas de cinza apresentaram valores próximos de percentagem de manchas, demonstrando que o espaço de cores em escala de cinza pode ser utilizado, beneficiando-se do seu menor custo computacional. Ao aumentar o valor de k nesses experimentos, a partir da interação do usuário, obtiveram-se resultados não satisfatórios (NS). Destaca-se que o Tyche (2015) também pode ser empregado para outras manifestações patológicas, como eflorescência, objetivado quantificar e identificar as regiões da fachada com danos.

Concluiu-se que os métodos adotados são promissores pelos resultados obtidos. A pesquisa visando a geração de mapas de danos por meio das técnicas DSM, PDI e da utilização de Vant abrangeu a aplicação de métodos multidisciplinares, como suporte às técnicas de inspeção e monitoramento de manifestações patológica, podendo ser empregadas em edifícios, pontes e barragens.

Referências

AGISOFT PhotoScan User Manual: professional edition, Version 1.1. 2014.

AMORIM, A. L. Fotogrametria: uma introdução. In: PRATINI, E. F.; SILVA, E. A. **Criação, Representação e Visualização Digitais**. Brasília: Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2012.

BRITO, B. L. de; GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. de. O Uso da Tecnologia Dense Stereo Matching Para Levantamento de Edificações Existentes. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DOCUMENTAÇÃO DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO COM O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS, 2., Belém, 2012. **Anais...** Belém: ARQDOC, 2012.

DONEUS, M. *et al.* From Deposit to Point Cloud: a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. In: INTERNATIONAL CIPA SYMPOSIUM, 23., Prague, 2011. **Proceedings...** Prague, 2011.

ESQUEF, I. A.; ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro, 2003.

FORAMITTI, H. **La Photogrammetrie au Service des Conservateurs**. 12. ed. Roma: ICCROM, 1973.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Reading: Addison-Wesley, 2010.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Dense Stereo Matching (DSM): conceitos, processos e ferramentas para criação de nuvens de pontos por fotografias. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 16., Fortaleza, 2012. **Proceedings...** Fortaleza, 2012.

GROETELAARS, N. J. **Um Estudo da Fotogrametria Digital na Documentação de Formas Arquitetônicas e Urbanas**. Salvador, 2004. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

KOUTSOUDIS, A. *et al.* **3DDigitisation of Icons of European Architectural and Archaeological Heritage**: case studies for testing the digitisation process interim report. 2012. Project co-funded by the European Commission within the ICT Policy Support Programme. 2012

KOUTSOUDIS, A. *et al.* Multi-Image 3D Reconstruction Data Evaluation. **Journal of Cultural Heritage**, v. 15, n. 1, p. 73-79, jan./feb. 2014.

LI, J. *et al.* Dense Stereo Matching Method Based on Local Affine Model. **Journal of Computers**, v. 8, n. 7, jul. 2013.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de Imagens Digitais**: princípios, algoritmos e aplicações. 30. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2008.

PIERROT-DESEILLIGNY, M.; DE LUCA, L.; REMONDINO, F. Automated Image-Based Procedures For Accurate Artifacts 3D Modeling and Orthoimage Generation. **Geoinformatics CTU FCE**. 2011. Disponível em: <<http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/113.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

REICH, M.; WIGGENHAGEN, M.; MUHLE, D. Filling the Holes: potential of UAV- based photogrammetric façade modelling. In: TAGUNGSBAND DES 15. 3D-NORDOST WORKSHOPS DER GFAT, Berlin, 2012. **Proceedings...** Berlin, 2012.

RUIZ, L. A.; LERMA, J. L.; GIMENO, J. Application of Computer Vision Techniques to Support in the Restoration of Historical Buildings. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, Graz-Austria, 2002. **Proceedings...** Graz-Austria: ISPRS, 2002.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentos de Processamento Digital de Imagens:** uma abordagem prática com exemplos em Matlab. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SZELISKI, R. **Computer Vision:** algorithms and applications. London: Springer, 2010.

TANG, L.; WU, C., CHEN, Z. Image Dense Matching Based on Region Growth With Adaptive Window. **Pattern Recognition Letters**, v. 23, p. 1169–1178, 2002.

TAVANI, S. *et al.* Building a Virtual Outcrop, Extracting Geological Information From It, and Sharing the Results in Google Earth via Open Plot and Photoscan: an example from the Khaviz Anticline (Iran). **Computers & Geosciences**, v. 63, p. 44–53, 2014.

TYCHE. **A Computational Tool for Damage Identification Using Image Processing.** Versão 1. Francisco Evangelista Junior, 2015. Programa não registrado a ser patenteado.

VERHOEVEN, G. Taking Computer Vision Aloft: Archaeological Three-Dimensional Reconstructions From Aerial Photographs With Photoscan. **Archaeological Prospection**, v. 18, n. 1, p. 67-73, 2011.

WALFORD, A. **A New Way to 3D Scan:** photo-based scanning saves time and money. 2009.

Disponível em:

<<http://www.photomodeler.com/downloads/ScanningWhitePaper.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2013.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Carlos Mariano Melo Júnior

Instituto Federal de Sergipe | Rua Café Filho, 260, Cidade Nova | Estância - SE - Brasil | CEP 49200-000 | Tel.: (79) 99151-5669 | E-mail: carlosmmjunior@gmail.com

Francisco Evangelista Junior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade de Brasília | Av. L2 Norte, Faculdade de Tecnologia | Brasília - DF - Brasil | CEP 70910-900 | Tel.: (61) 3107 1003 | E-mail: fejr@unb.br

Lenildo Santos da Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade de Brasília | Tel.: (61) 3107-1009 | E-mail: lenildo_s@hotmail.com

Antônio Alberto Nepomuceno

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade de Brasília | SHIN QL 07 Conjunto 03 Casa 12 | Brasília - DF - Brasil | CEP 71515-035 | Tel.: (61) 99964 1676 | Tel.: (61) 3222 0816 | E-mail: aa.nepomuceno@gmail.com

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.