



Monitoramento de Integridade Estrutural por Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas

Use of Unmanned Aerial Vehicle in Structural Health Monitoring Based on Photogrammetric Methods

Victor dos Santos Marotta ¹, Maria Luiza Amaral de Souza ², Neuman Otávio Freitas Assis ³, Nilcilene das Graças Medeiros ⁴ e Gustavo de Souza Veríssimo ⁵

¹ Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. victordossantosmarotta@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8108-6197>

² Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. marialuizaamaral@yahoo.com.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8796-4344>

³ Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. neumanotavio@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4455-4748>

⁴ Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. nilcilene.medeiros@ufv.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0839-3729>

⁵ Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. gustavo@ufv.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8858-9985>

Recebido: 03.2022 | Aceito: 04.2026

Resumo: O monitoramento da integridade de estruturas objetiva analisar o comportamento de uma estrutura ao longo do tempo, provendo aos seus responsáveis informações para a tomada de decisão quanto à sua segurança. Diversos métodos de medição por instrumentos são utilizados para medir grandezas de interesse para a avaliação da integridade de estruturas, quase sempre usando-se sensores de contato. Entretanto, o custo de uma instrumentação de contato e a dificuldade de acesso a algumas estruturas muitas vezes limitam seu emprego. Neste trabalho foi feita uma reconstrução tridimensional por estereoscopia de uma estrutura, empregando imagens obtidas por um veículo aéreo não tripulado em um levantamento fotogramétrico a curta distância. Utilizando como cenário um ensaio de flexão numa viga de aço, foram obtidas imagens da viga descarregada e, posteriormente, da viga carregada. As fotografias foram reconstituídas em *software* de processamento fotogramétrico e, a partir delas, foram medidos os deslocamentos sofridos pela viga devido ao carregamento aplicado. Os deslocamentos determinados com técnicas fotogramétricas foram então comparados com os medidos por transdutores de deslocamento posicionados sob a viga. A partir dos experimentos observou-se que os deslocamentos estimados por fotogrametria apresentaram discrepância máxima de 28% (em torno de 0,9 mm) dos valores medidos pelos transdutores, demonstrando o potencial da técnica para aplicação em estruturas reais.

Palavras-chave: Fotogrametria. Monitoramento de Integridade Estrutural. Veículo Aéreo Não-Tripulado. Medição de Deslocamentos.

Abstract: Structural health monitoring analyzes the behavior of a given structure over time, providing those responsible for its safety with valuable information. Several instrumentation methods, mainly employing contact sensors, assess parameters relevant to evaluating structural integrity. However, the cost of contact instrumentation and the problematic access to specific structures often limit the application of these methods. This paper employed a technique for the three-dimensional reconstruction of a structure through stereoscopy, using images obtained by an unmanned aerial vehicle (UAV) in a short-distance photogrammetric survey. A UAV obtained images of the beam in its unloaded and loaded stages with a steel-beam bending test as the subject. The photographs were then reconstructed in a digital environment, and the displacements suffered by the beam due to load were measured. The displacements discovered through photogrammetric techniques were compared to those obtained by displacement transducers placed under the beam. The displacements estimated by photogrammetry were close to the values measured by the transducers, demonstrating the technique's potential for application in real structures.

Keywords: Photogrammetry. Structural Health Monitoring. Unmanned Aerial Vehicle. Deflections measurement.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas estruturais do ramo da engenharia geralmente possuem alto custo e exercem um papel essencial na atividade socioeconômica de um país, principalmente grandes estruturas sujeitas a cargas móveis e intempéries, tais como pontes e viadutos. Por essas razões, é razoável que se busque garantir a estabilidade e integridade das estruturas ao longo de sua vida útil. Entende-se por integridade estrutural a capacidade de uma estrutura de desempenhar suas funções de forma segura e eficiente, sem apresentar falhas ou degradações que comprometam sua resistência, estabilidade ou durabilidade. Essa garantia é fundamental tanto para a segurança dos usuários quanto para a manutenção das operações de transporte sem interrupção.

Grande parte dessas estruturas em todo o mundo está chegando ao fim de sua vida útil prevista (An et al., 2015), mas devido as restrições econômicas e logísticas, muitas dessas estruturas permanecem em uso por algum tempo, apesar do envelhecimento e acúmulo de danos, podendo comprometer a segurança dos usuários e a preservação do patrimônio público e privado. Por isso, a necessidade de monitorar e manter a integridade das estruturas civis vem se tornando cada vez mais relevante ao longo do tempo (Farrar & Worden, 2007; Jang et al., 2011; Spencer et al., 2004).

O monitoramento periódico de respostas estruturais proporciona aos responsáveis informações primordiais do comportamento estrutural para as tomadas de decisão, sejam elas relacionadas a situações que requerem intervenção ou que envolvem o risco da estrutura ter sua capacidade excedida.

Diversas técnicas de medição e processos de análise, que vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo, integram um campo de conhecimento na engenharia estrutural referido como Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*). O objetivo da SHM é obter dados que permitam avaliar o estado da estrutura ao longo do tempo, essa avaliação pode ser feita por meio de um monitoramento de diversas variáveis, tais como deformações, acelerações e deslocamentos.

As técnicas para medição desses parâmetros em campo no passado eram de difícil emprego, tanto pelo custo de implantação como pela eventual dificuldade de se acessar os pontos de interesse na estrutura onde deveriam ser instalados os sensores. As técnicas mais antigas de SHM envolvem sensores de contato elétricos. Mais recentemente vêm se aprimorando técnicas baseadas em sensores de fibra ótica (Sakiyama et al., 2019) e técnicas baseadas em sensoriamento remoto (Park et al., 2007; Marchewka, 2020).

Métodos baseados em técnicas de levantamento remoto e Processamento Digital de Imagens (PDI) têm sido avaliados para realizar o monitoramento de estruturas (Naumann et al., 2014; Chiu et al., 2017; Khaloo et al., 2018, Wang et al., 2020). Nos últimos anos têm-se observado diversos avanços nessas tecnologias, notadamente a melhoria da resolução espacial dos métodos de medição de superfície (Naumaann et al., 2014).

Khaloo et al. (2018) apontam que uma das tecnologias mais precisas para gerar modelos tridimensionais é a *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). A técnica permite a reconstrução tridimensional de superfícies a partir de uma nuvem de pontos obtida a partir de medições utilizando um *laser* sobre a estrutura. Embora com alta eficiência, a técnica apresenta um custo elevado e um acesso estável ao ambiente monitorado pelo profissional.

Outras possibilidades de monitoramento de maior acessibilidade vêm surgindo, de acordo com Achille et al. (2015), a fotogrametria realizada por Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) pode não substituir a fotogrametria convencional para grandes territórios, mas fornece uma solução eficiente para pequenas áreas e levantamentos de grande escala. Além disso, esses pequenos veículos fornecem soluções rápidas para alguns problemas como o levantamento de alta resolução de pavimentos e superfícies verticais como, por exemplo, torres altas e grandes pontes e viadutos.

Embora a combinação de uma câmera acoplada à um ARP seja aparentemente eficiente, não se encontra na literatura estudos em abundância que podem assegurar quanto aos dados fornecidos e resultados gerados através desta tecnologia. Neste sentido, propõe-se neste estudo avaliar os resultados encontrados a partir de uma simulação experimental-prática de um monitoramento de estrutura utilizando uma tecnologia fotogramétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A modelagem tridimensional de uma dada estrutura através de fotogrametria exige a determinação das coordenadas no espaço objeto dos pontos fotogramétricos que as compõem, determinando assim a relação geométrica da fotografia com suas adjacentes (Foster & Halbstein, 2014). A reconstrução do espaço objeto necessita do conhecimento de parâmetros que estabeleçam a geometria de aquisição das fotografias, tanto no espaço imagem quanto no espaço objeto, denominados Parâmetros de Orientação Interior (POI) e Parâmetros de Orientação Exterior (POE), respectivamente. Tais informações podem ser obtidas no processo de fototriangulação com parâmetros adicionais (Linder, 2016).

Na fototriangulação, o ajustamento por feixes perspectivos com parâmetros adicionais permite em um único ajustamento obter os parâmetros da orientação exterior para todas as imagens do voo, associados às coordenadas no espaço-objeto de pontos de controle previamente medidos (Coelho & Brito, 2007). Esse método busca a reconstrução dos feixes de luz formadores do espaço-imagem no momento de geração da imagem. É realizado o ajustamento pelo Método dos Mínimos-Quadrados (MMQ), para que cada raio ajustado percorra o mais próximo possível de seu homólogo no espaço-imagem e do centro de perspectiva da imagem. Esta condição de colinearidade é expressa pelas Equações 1 e 2 (Andrade, 2003):

$$x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y = y_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

onde x, y são as coordenadas do ponto no espaço-imagem (mm). x_0, y_0 são as coordenadas do ponto principal no espaço-imagem (mm), representando o deslocamento do ponto principal em relação ao sistema de coordenadas da imagem. f é a distância focal gaussiana calibrada (mm). X, Y, Z são as coordenadas de um ponto no espaço-objeto (m). X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas no espaço-objeto do centro perspectivo (m).

Sendo r_{ij} os elementos da matriz de rotação ortogonal R , apresentada na Equação 3, que contém os ângulos de rotação κ, φ, ω (Coelho & Brito, 2007).

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & -\sin \omega \cdot \cos \varphi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

Assim, os parâmetros de orientação exterior ($X_0, Y_0, Z_0, \kappa, \varphi, \omega$), bem como as coordenadas tridimensionais no espaço objeto (X, Y, Z) dos pontos fotogramétricos são determinados simultaneamente no mesmo ajustamento, que é realizado por bloco de imagens. É fundamental para a aquisição de imagens com alta precisão o estabelecimento de um referencial com métodos altamente precisos. A partir das coordenadas no espaço objeto, os pontos do referencial são localizados nas imagens e suas coordenadas no espaço imagem são obtidas de forma a referenciar o modelo ao espaço real.

Para se alcançar bons resultados em uma fototriangulação, um fator importante é a alta precisão durante o processo de identificação e medição das coordenadas no espaço imagem. Atualmente, esse processo pode ser realizado a partir do *matching* de imagens, que consiste na identificação automática de pontos homólogos entre imagens, realizada a fim de identificar e medir automaticamente coordenadas de pontos homólogos a serem utilizados para o processo de fototriangulação. A comparação de imagens para identificação de pontos consiste em percorrer uma matriz de amostra de uma das imagens em uma janela, denominada de matriz de busca na imagem homóloga e calcular, para cada posição da matriz amostra, um valor de comparação (Andrade, 2003). Um dos métodos de comparação de imagens é o de correlação, ele utiliza os valores de cor de cada imagem para buscar a correlação entre a matriz de amostra e a matriz busca, através da Equação 4 (Andrade, 2003).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n x_i)^2\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)^2\right)}} \quad (4)$$

onde x_i é o valor da cor do pixel i na matriz de amostra. y_i é o valor da cor do pixel i na matriz de busca. n é o número de pixels na matriz de amostra. r é o valor da correlação.

O valor da correlação r obtido varia entre -1 e 1. Um valor próximo a 1 significa uma correlação positiva. Um valor próximo a -1 indica uma correlação negativa e um valor próximo a 0 indica que não há correlação entre as variáveis. Desta forma o algoritmo desloca a matriz amostra pixel a pixel sobre a matriz de busca, calculando a correlação entre elas em cada posição a fim de encontrar pontos fotogramétricos compartilhados pelas imagens, que serão importantes para o processo de fototriangulação.

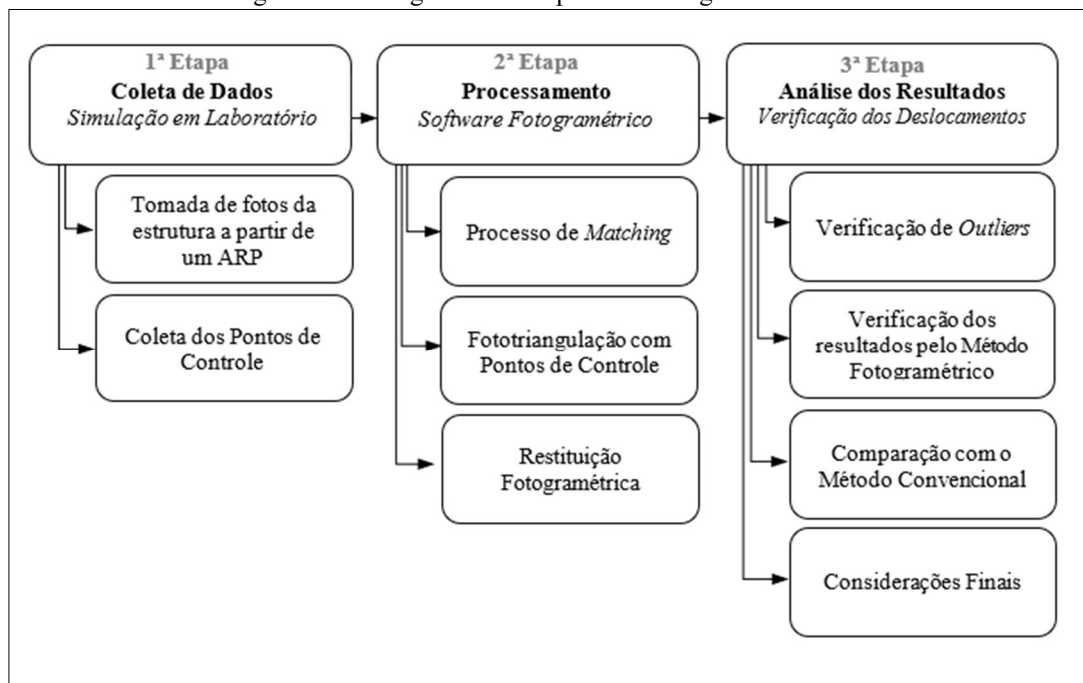
Softwares de processamento fotogramétricos utilizam o processo de *matching* para identificar automaticamente pontos homólogos entre imagens e conseguir agrupar cenas que tenham as mesmas características, no espaço imagem e utilizam o processo de fototriangulação para fazer a amarração do espaço imagem ao espaço objeto através da utilização de pontos de controle.

A partir da modelagem tridimensional ajustada é possível obter medidas dos objetos através da restituição fotogramétrica. Esse procedimento consiste em transformar a projeção perspectiva do fotograma em uma projeção ortogonal.

3 METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta um fluxograma com as etapas metodológicas desenvolvidas, que teve como objetivo principal avaliar os resultados encontrados a partir de uma simulação experimental-prática de um monitoramento de estrutura utilizando uma tecnologia fotogramétrica.

Figura 1 – Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.



Fonte: Os autores (2022).

3.1 Considerações Iniciais

Para que fosse possível fazer as medições de deslocamentos desejadas, foi montado um ensaio de flexão numa viga de aço, conforme mostrado na Figura 2

Figura 2 – Aspecto do ensaio de flexão.

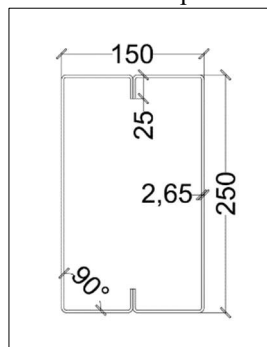


Fonte: Os autores (2022).

3.2 Montagem do Experimento

A viga de aço, que serviu como corpo de prova, é constituída por um perfil caixa, cuja seção transversal e as respectivas dimensões estão mostradas na Figura 3. O comprimento longitudinal entre os pontos de apoio do corpo de prova era de 5701 mm.

Figura 3 –Esquema da seção transversal do perfil da viga de aço utilizada (mm).



Fonte: Os autores (2022).

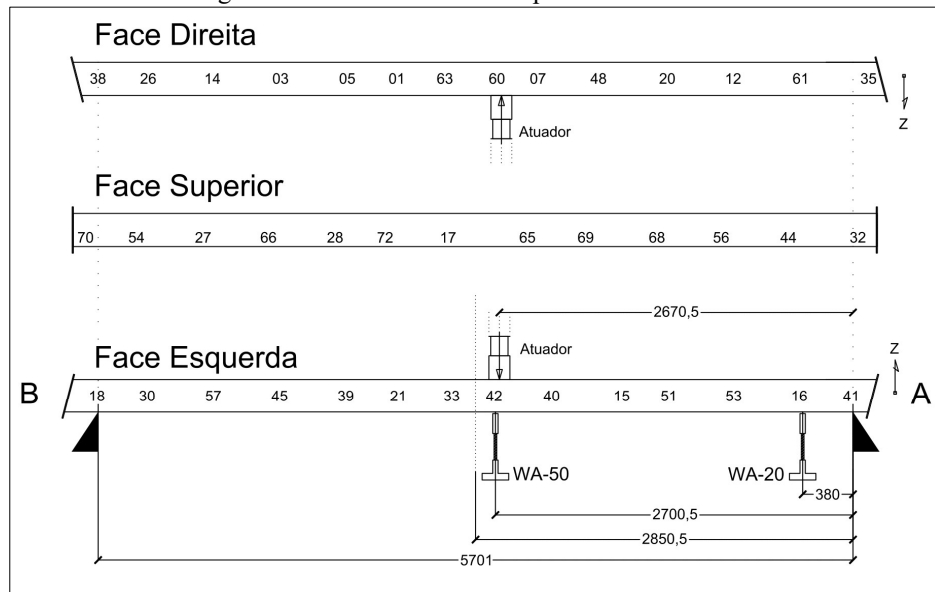
A viga foi apoiada, em ambas as extremidades, sobre barras cilíndricas de aço com 38 mm de diâmetro, simulando duas rótulas perfeitas. As barras cilíndricas foram apoiadas, cada uma, sobre uma placa de aço com um sulco, a fim de limitar seu deslocamento horizontal. Toda a estrutura foi posicionada sobre um bloco de concreto em cada extremidade.

Para aplicação de força no centro do vão da viga, foi utilizado um atuador hidráulico Nowak de ação dupla, modelo CDT 100200, com capacidade de 1000 kN, e dois transdutores de deslocamento: um com curso de 20 mm, posicionado próximo a uma das extremidades da viga, e outro com curso de 50 mm, posicionado abaixo do ponto de aplicação de força.

De forma a estabelecer um sistema de coordenadas local para o experimento foram realizadas medidas de pontos de controle fixados na laje de reação do laboratório. Para isso, utilizou-se uma estação total e um miniprisma devidamente calibrados, sendo os pontos coletados pelo método de irradiação. Foram fixados ainda 41 pontos de interesse ao longo da estrutura, sendo 13 pontos na parte superior e 14 em cada lado da estrutura, para que fosse possível calcular as coordenadas de interesse ao longo da viga e a comparação entre os modelos fotogramétricos.

Os pontos foram posicionados em grupos com distâncias semelhantes ao longo da viga, com dois grupos de pontos posicionados sobre os transdutores de deslocamento, de forma a obter uma medida de referência precisa para a flecha de deslocamento máximo e para a flecha de deslocamento próxima ao apoio. Na Figura 4 apresenta-se o posicionamento dos pontos ao longo da viga, o posicionamento do atuador bem como dos transdutores com relação ao apoio na extremidade 1 e ao centro da peça, em milímetros.

Figura 4 – Posicionamento dos pontos de referência.



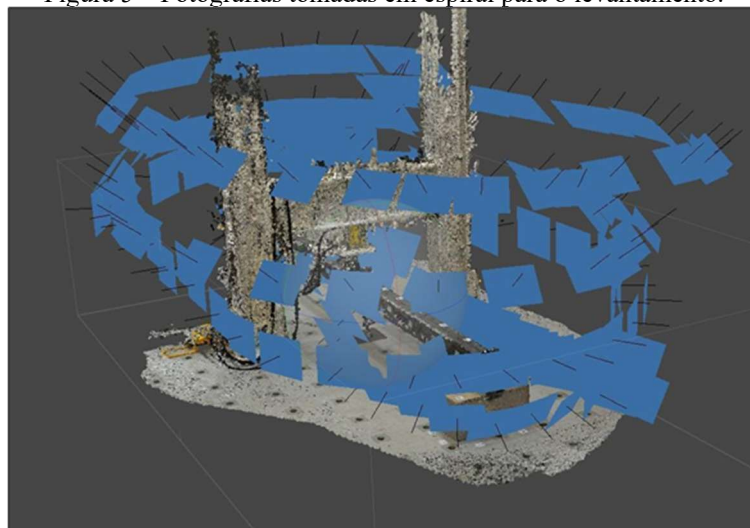
Fonte: Os autores (2022).

3.3 Execução do Levantamento Fotogramétrico

Para o levantamento fotogramétrico utilizou-se uma Aeronave Remotamente Pilotada do modelo DJI Mavic 2 Pro. O levantamento foi executado em duas etapas: primeiramente, com a estrutura em repouso e, em seguida, com o atuador aplicando uma carga de 12,05 kN no centro do vão. As tomadas de fotografias foram realizadas com a aeronave em voo, circulando a estrutura de cima para baixo, como apresenta a Figura 5.

Para a primeira etapa, com a viga descarregada, foram tomadas 331 fotografias, e na segunda, 162 fotografias; o objetivo das tomadas de fotografia nas duas etapas foi a máxima cobertura fotogramétrica possível, de forma a possibilitar uma melhor reconstrução do modelo tridimensional final. As imagens foram tomadas com uma distância média de 2,50 metros do corpo de prova.

Figura 5 – Fotografias tomadas em espiral para o levantamento.

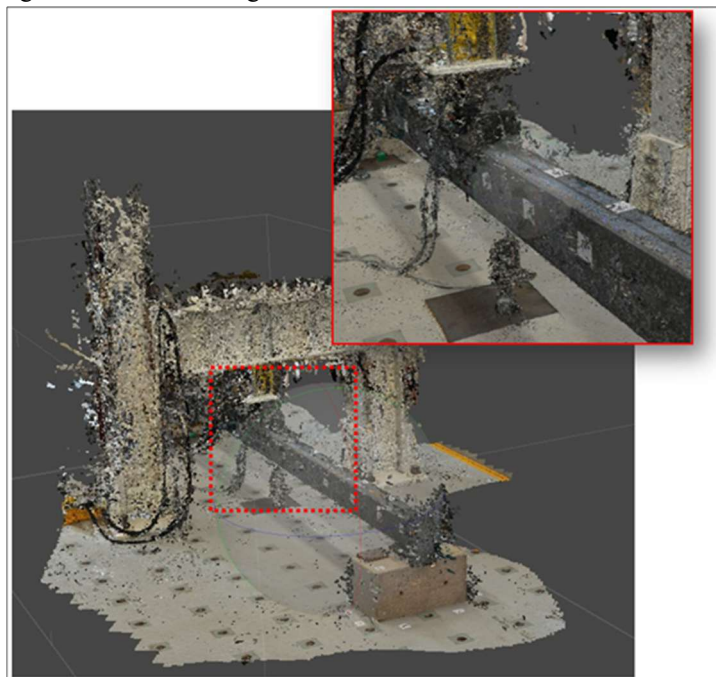


Fonte: Os autores (2022).

3.4 Processamento dos Dados

O processamento dos dados foi realizado com o *software Agisoft Metashape 1.5.2* e teve como objetivo gerar o modelo fotogramétrico densificado (nuvem densa de pontos) das estruturas. O resultado do modelo densificado é apresentado na Figura 6, em detalhe, com detalhe na reconstrução fotogramétrica da interação entre o atuador e a viga.

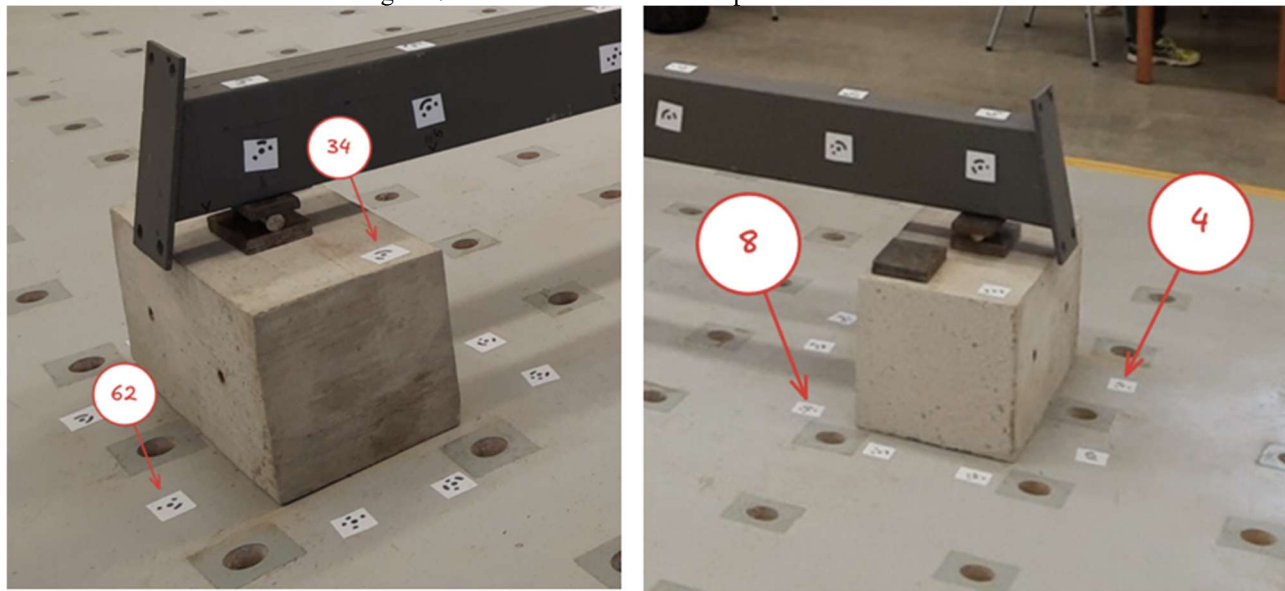
Figura 6 – Modelo fotogramétrico densificado e em detalhe.



Fonte: Os autores (2022).

O sistema de referência local foi estabelecido por 4 pontos, sendo escolhidos 2 no piso do laboratório, próximo a uma das extremidades de um dos blocos de apoio e 2 na outra extremidade, sendo um posicionado no bloco de apoio e outro no piso do laboratório. A escolha dos pontos de controle fora do objeto em estudo é importante para garantir a qualidade dos resultados, de forma que quando o objeto muda de posição em relação ao referencial adotado, as medidas tomadas representem os deslocamentos verdadeiros da peça. A Figura 7 apresenta os pontos de referência no piso do laboratório.

Figura 7 – Pontos de referência no piso do laboratório.



Fonte: Os autores (2022).

Ao identificar os pontos de controle nas fotografias o *software* realizou-se o ajuste do modelo de acordo com o novo sistema de referência, apresentando os resíduos do modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao analisar o comportamento dos 4 pontos de referência nos 2 modelos: sob carga e sem carga,

observa-se que os valores de desvios não representam necessariamente o desvio das coordenadas no sistema de referência, mas sim o desvio resultante do ajuste do modelo fotogramétrico, levando em consideração que os pontos de referência não sofreram interferência direta do atuador, sendo assim, valores baixos de desvios indicam uma boa adequação do modelo fotogramétrico às injunções inseridas. A Tabela 1 apresenta esses resíduos.

Tabela 1 – Pontos de controle utilizados no referenciamento do modelo fotogramétrico (Figura 7) e seus respectivos resíduos em cada modelo.

Situação	Alvo	Desvios			
		XYZ (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
sob carga	4	0,871	0,224	-0,241	-0,806
	8	0,823	-0,116	0,345	0,738
	34	1,075	-0,658	0,815	-0,239
	62	1,114	0,550	-0,918	0,307
sem carga	4	0,923	0,191	-0,508	-0,747
	8	0,888	-0,071	0,555	0,689
	34	0,823	-0,340	0,649	-0,375
	62	0,848	0,221	-0,695	0,433

Fonte: Os autores (2022).

Observa-se que os desvios absolutos não ultrapassam 1,0 mm nas componentes planimétricas, e são inferiores a 0,8 mm na componente altimétrica. Esses resultados foram considerados satisfatórios para o experimento considerando que estão dentro das imprecisões dos equipamentos.

Como a reconstrução fotogramétrica de um modelo atua nos 3 eixos de coordenadas, caso um determinado ponto não seja corretamente determinado com precisão nas coordenadas X e Y, supõe-se ele não será corretamente determinado em Z. Para avaliar a precisão dos resultados, realizou-se uma análise empregando o cálculo da discrepância em X e Y entre os modelos obtidos nas duas etapas. Do resultado calculou-se uma resultante, a partir da qual, utilizando uma análise *boxplot* nos dados, identificaram-se 4 *outliers*, apresentados na Tabela 2, todos no lado esquerdo do corpo de prova.

Tabela 2 – Análise *boxplot* nos dados

Ponto	Discrepância em X (m)	Discrepância em Y (m)	Resultante Planimétrica/XY (m)	Análise <i>Boxplot</i>	Posição	Distância de A
16	4,702	2,499	5,325	<i>Outlier</i>	Face Esq.	0,532
53	8,729	5,509	10,322	<i>Outlier</i>	Face Esq.	1,030
51	6,736	4,142	7,907	<i>Outlier</i>	Face Esq.	1,523
15	-0,725	-0,226	0,759	<i>Outlier</i>	Face Esq.	1,867

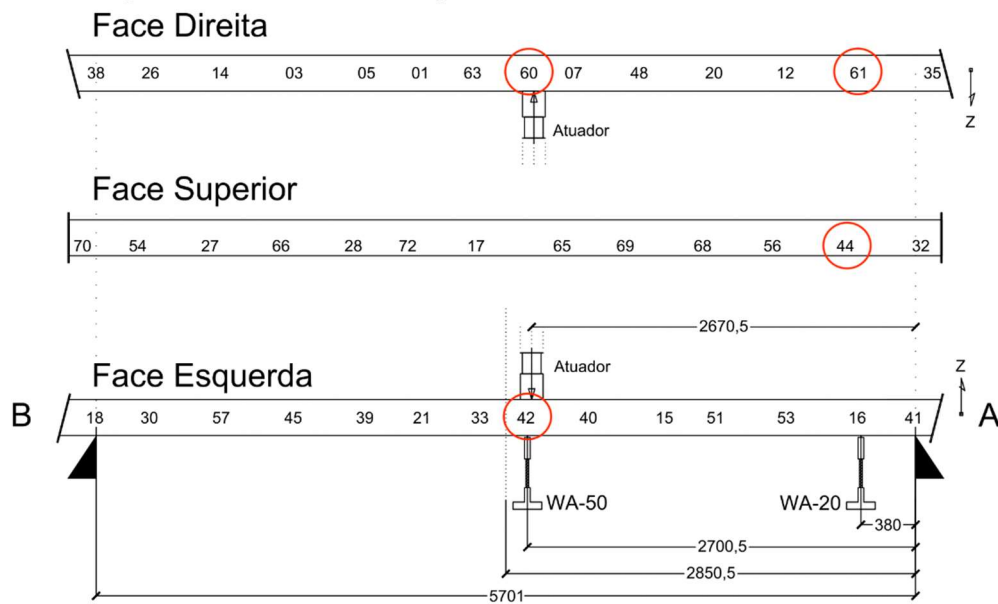
Fonte: Os autores (2022).

O critério de determinação dos *outliers* levou em consideração as medições realizadas pelos transdutores de deslocamento, a saber, o deslocamento vertical de 3,34mm medido pelo transdutor WA-20, posicionado próximo à extremidade A, e o deslocamento de 14,73mm medido pelo transdutor WA-50, posicionado próximo ao ponto de aplicação da força no centro do vão. Desta forma, as discrepâncias encontradas nestes pontos foram muito superiores à média de deslocamentos dos dois transdutores, chegando a ser até 1.142 vezes superior, de acordo com a resultante planimétrica do ponto 53.

Descartados os *outliers*, realizou-se a análise dos dados para os 36 pontos fixados ao longo da estrutura, sendo analisadas suas posições na barra e a flecha resultante da subtração da componente Z entre os modelos tomados na primeira e na segunda etapas.

Para a análise do deslocamento máximo (também denominado flecha máxima) no centro do vão obtida pelo modelo fotogramétrico foram utilizadas as médias das leituras de deslocamento vertical dos pontos 42 e 60, localizados acima do transdutor WA-50, posicionado no centro do vão. De forma análoga, foram obtidas as médias das leituras de deslocamento vertical nos pontos 44 e 61, posicionados acima do transdutor WA-20, para avaliar os deslocamentos verticais próximo ao apoio. A Figura 8 apresenta o posicionamento dos pontos.

Figura 8 – Posicionamento dos pontos de leitura dos deslocamentos verticais.

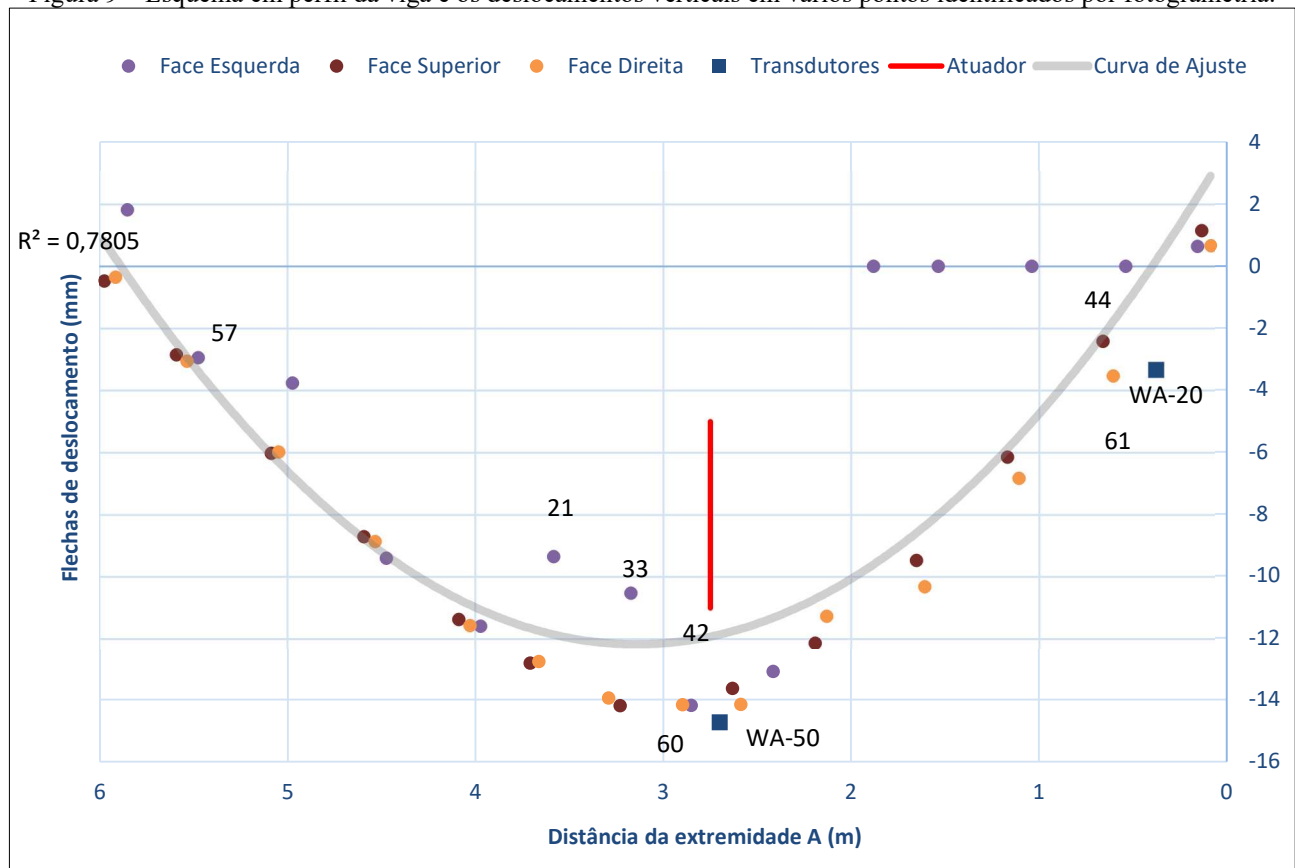


Fonte: Os autores (2022).

A flecha real da viga no centro do vão, para comparação com o valor calculado com um modelo teórico, foi determinada subtraindo-se o deslocamento no apoio devido à acomodação elástica.

Os resultados obtidos são exibidos no gráfico apresentado na Figura 9, sendo destacados os pontos de interesse 44, 61, 42 e 60, além dos pontos 33, 21 e 57, tidos como fora da curva, mas ainda assim representativos das medidas realizadas. O gráfico apresenta ainda uma curva de ajuste às flechas encontradas pelo modelo fotogramétrico, que ilustra com exagero vertical o eixo da viga utilizada no experimento, entre as extremidades A e B. Foram consideradas como referência, para avaliação da precisão do método fotogramétrico, as medições realizadas pelos transdutores de deslocamento, WA-20 e WA-50.

Figura 9 – Esquema em perfil da viga e os deslocamentos verticais em vários pontos identificados por fotogrametria.



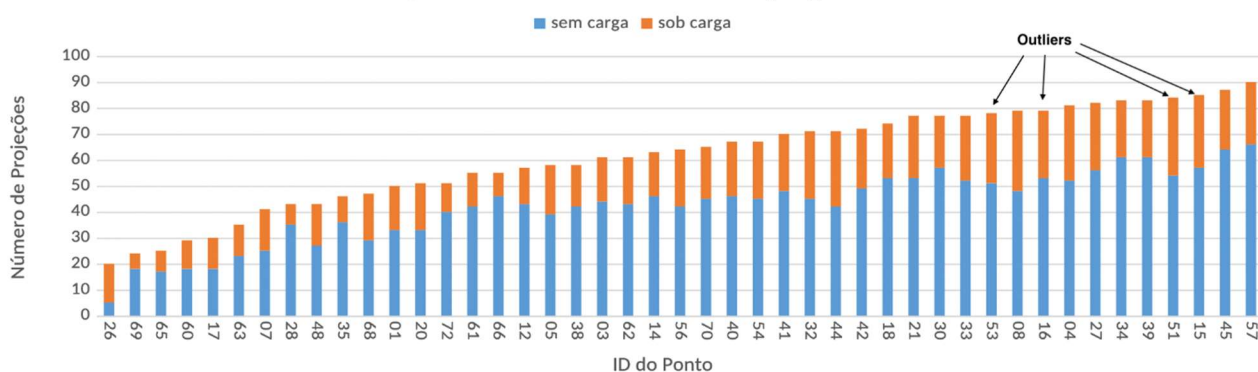
Fonte: Os autores (2022).

Foi observado inicialmente a baixa homogeneidade das medidas obtidas em alguns pontos na face esquerda da viga. Além dos pontos 33, 21 e 57 destacados, notam-se ainda os pontos tidos como outliers, estes não apresentados no gráfico mas exibidos na Tabela 2. Foram levantadas duas hipóteses para as medidas dispersas nesta face: a oclusão de tais pontos pela estrutura de reação em parte das fotografias e a passagem mais rápida da aeronave pela face esquerda, sendo tomadas menos fotografias, de modo que os pontos foram projetados em menos imagens.

A primeira hipótese se mostrou falsa uma vez que os pontos na face esquerda que apresentaram discrepância da curva se encontravam sem nenhuma obstrução, pois se encontravam nas extremidades da barra, ao passo que o ponto 42, posicionado abaixo do atuador e parcialmente obstruído pela estrutura de reação, não apresentou discrepância com relação à curva, sendo inclusive tomado como referência para medição da flecha máxima.

Analisando o número de ocorrências por ponto, ou seja, o número de vezes que um ponto aparece em imagens, observa-se também que a segunda hipótese se mostra falsa. A Figura 10 apresenta as ocorrências por pontos e pode-se observar que os pontos tidos como outliers são projetados em mais de 60 imagens em todas as situações, observa-se que o mesmo ocorre para os pontos 21, 33 e 57, que apresentaram maior dispersão com relação à curva de ajuste.

Figura 10 – Número de ocorrências por ponto.



Fonte: Os autores (2022).

O deslocamento vertical na região do apoio (δ_a), devido à acomodação elástica dos vários componentes sobrepostos nesse ponto, é determinado pela subtração entre a média dos pontos 16, 61 e 44, dada como flecha experimental (δ_e) e a flecha teórica calculada (δ_t). Desconsiderando o ponto 16, dado como *outlier*, encontra-se o valor de -2.975mm para a flecha média na posição do transdutor próximo ao apoio. A acomodação elástica no apoio pode ser calculada conforme a Equação 5, a partir das medições por imagem.

$$\begin{aligned}\delta_a &= \delta_e - \delta_t = -2,975 - (-2,13) \\ \therefore \delta_a &= -0,845 \text{ mm}\end{aligned}\quad (5)$$

Subtraindo o deslocamento devido à acomodação elástica nos apoios da flecha máxima obtida (-14,193 mm), a flecha estimada por fotogrametria no centro do vão da viga é dada conforme a Equação 6.

$$\begin{aligned}\delta_e &= \delta_{max} - \delta_a = -14,193 - (-0,845) \\ \therefore \delta_e &= -13,348 \text{ mm}\end{aligned}\quad (6)$$

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos com a medição direta e da análise pela aerofotogrametria com ARP.

Tabela 3 – Deslocamentos medidos pelos dois métodos.

Método	δ_{max} (mm)	δ_a (mm)	δ_e (mm)
Aerofotogrametria	-14,193	-0,845	-13,348
Transdutores de Deslocamento	-14,730	-1,210	-13,520
Erro (%)	-3,65%	-30,17%	-1,27%

Fonte: Os autores (2022).

As diferenças entre os valores de flecha no centro do vão da viga medidos pelos transdutores e obtidos por fotogrametria foram pequenos (inferiores a 4%). Para os deslocamentos próximos ao apoio, a diferença foi próxima a 30%, mas isto era esperado, uma vez que os deslocamentos nessa região são muito pequenos. Os deslocamentos estimados por fotogrametria para os pontos 61 e 44 não se apresentaram homogêneos.

Na Tabela 4 são apresentados os deslocamentos verticais da viga e seus erros associados para os pontos próximos aos transdutores medidos a partir de *software* CAD, onde é possível observar o valor divergente estimado para o ponto 44, possível causador do desvio na acomodação elástica.

Tabela 4 – Flechas estimadas na posição dos transdutores.

Transdutor	Ponto	Aerofotogrametria (mm)	Medição física (mm)	Discrepância (%)
WA-50	60	-14,162	-14,73	4
	42	-13,084	-14,73	11
WA-20	61	-3,532	-3,34	6
	44	-2,419	-3,34	28

Fonte: Os autores (2022).

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o uso da aerofotogrametria para monitoramento de deslocamentos estruturais é viável, apresentando boa concordância com as medições realizadas por transdutores de contato, especialmente em regiões de maior magnitude de deslocamento, onde os erros observados foram inferiores a 4%. Dessa forma, a técnica demonstra potencial para aplicação em monitoramento de integridade estrutural em condições reais.

A qualidade da definição do referencial não se mostrou um fator preponderante neste estudo, em função da curta distância e das condições controladas do experimento. No entanto, para aplicações em campo, recomenda-se o estabelecimento de um referencial robusto, com pontos de controle redundantes e medições de alta acurácia, de modo a garantir a confiabilidade dos resultados.

Observou-se também que a distribuição espacial dos pontos e a geometria de aquisição das imagens influenciam diretamente a qualidade dos resultados. As discrepâncias identificadas em pontos da face esquerda da estrutura indicam que limitações na aquisição ou reconstrução podem introduzir ruídos significativos, podendo comprometer análises baseadas em subconjuntos de dados. Assim, a cobertura adequada da estrutura e a redundância de observações são fatores críticos para a qualidade do modelo fotogramétrico.

Ressalta-se que o experimento foi conduzido em uma estrutura de pequenas dimensões. Para estruturas de maior porte, como pontes e viadutos, espera-se que a técnica apresente desempenho ainda mais favorável, uma vez que os deslocamentos a serem monitorados tendem a ser de maior magnitude relativa em relação à precisão do método.

Além disso, os levantamentos aerofotogramétricos com ARP apresentam vantagens operacionais relevantes, como menor custo, maior rapidez de aquisição e ausência de contato direto com a estrutura, em comparação com técnicas convencionais baseadas em sensores físicos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação da metodologia em estruturas reais de maior escala, bem como a investigação de diferentes estratégias de aquisição e definição de referenciais, visando à redução de incertezas e à melhoria da robustez dos resultados.

Referências

Achille, C., Adami, A., Chiarini, S., Cremonesi, S., Fassi, F., Fregonese, L., & Taffurelli, L. (2015). UAV-

- based photogrammetry and integrated technologies for architectural applications—Methodological strategies for the after-quake survey of vertical structures in Mantua (Italy). *Sensors*, 15(7), 15520–15539. <https://doi.org/10.3390/s150715520>
- Chiu, W. K., Ong, W. H., Kuen, T., & Courtney, F. (2017). Large structures monitoring using unmanned aerial vehicles. *Procedia Engineering*, 188, 415–423.
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, 303–315. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>
- Foster, S., & Halbstern, D. (2014). *Integrating 3D modeling, photogrammetry and design*. Springer.
- Jang, S., Sim, S. H., Jo, H., & Spencer, B. F. (2011). Full-scale decentralized damage identification using wireless smart sensors. In M. Tomizuka (Ed.), *Sensors and smart structures technologies for civil, mechanical, and aerospace systems* (Vol. 7981). SPIE.
- Khaloo, A., Lattanzi, D., Jachimowicz, A., & Devaney, C. (2018). Utilizing UAV and 3D computer vision for visual inspection of a large gravity dam. *Frontiers in Built Environment*, 4, 31.
- Linder, W. (2016). *Digital photogrammetry: A practical course* (4th ed.). Springer.
- Marchewka, A., Ziółkowski, P., & Aguilar-Vidal, V. (2020). Framework for structural health monitoring of steel bridges by computer vision. *Sensors*, 20(3), 700. <https://doi.org/10.3390/s20030700>
- Naumann, M., et al. (2014). Deformation analysis of dikes using unmanned aerial systems (UAS). In *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction* (pp. 119–126).
- Park, H. S., Lee, H. M., Adeli, H., & Lee, I. (2007). A new approach for health monitoring of structures: Terrestrial laser scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22, 19–30.
- Sakiyama, F. I. H., Lehmann, F., & Garrecht, H. (2019). Structural health monitoring of concrete structures using fibre-optic-based sensors: A review. *Magazine of Concrete Research*. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00185>
- Spencer, B. F., Ruiz-Sandoval, M. E., & Kurata, N. (2004). Smart sensing technology: Opportunities and challenges. *Structural Control and Health Monitoring*, 11(4), 349–368. <https://doi.org/10.1002/stc.48>
- Wang, H.-F., Zhai, L., Huang, H., Guan, L.-M., Mu, K.-N., & Wang, G.-P. (2020). Measurement for cracks at the bottom of bridges based on tethered creeping unmanned aerial vehicle. *Automation in Construction*, 119, 103330. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103330>

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo apoio técnico e institucional ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte por meio das bolsas de mestrado concedidas aos pesquisadores Victor dos Santos Marotta, Maria Luiza Amaral de Souza e Neuman Otávio Freitas Assis.

Contribuição dos Autores

Victor dos Santos Marotta: Conceituação, Metodologia, Aquisição de dados, Processamento de dados, Redação – versão original, Revisão e edição, Administração do projeto. Maria Luiza Amaral de Souza: Metodologia, Investigação, Curadoria de dados, Análise formal, Redação – versão original. Neuman Otávio Freitas Assis: Metodologia, Investigação, Definição dos referenciais, Análise formal, Redação – versão original. Gustavo Veríssimo: Conceituação, Fundamentação teórica (SHM), Instrumentação, Revisão e edição. Nilcilene das Graças Medeiros: Conceituação, Supervisão, Revisão e edição.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não possuem conflitos de interesse financeiros, pessoais ou institucionais que possam ter influenciado os resultados apresentados neste estudo.

Biografia do autor principal



Victor dos Santos Marotta, nascido em 1996 em Guidoal, Brasil, é Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo e mestre em Engenharia Civil, com concentração em Informações Espaciais, ambos pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente, atua como Chefe de Engenharia na Territorial Softwares e como Tecnologista em Informações Geográficas no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em Brasília, DF. Seus interesses de pesquisa incluem aerofotogrametria, automação de processos, sistemas de informação geográfica (SIG) e desenvolvimento de software aplicado a dados espaciais.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.