

AVALIAÇÃO DE ESPECTROS DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO CÂMERAS COMO SENSORES DE FREQUÊNCIA SEM CONTATO

José Eduardo de Lima Simão⁽¹⁾ (jesimao@utfpr.edu.br), Marcos Hiroshi Takahama⁽²⁾ (mhtakahama@hotmail.com), Adailton Silva Borges⁽³⁾ (adailton@utfpr.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); PPGEM-CP

⁽²⁾ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); PPGEM-CT

⁽³⁾ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); DAMEC-CP

RESUMO: *O presente trabalho aborda o estudo de espectros de frequências em estruturas submetidas a deslocamentos dinâmicos. Propondo o uso de uma metodologia desenvolvida em ambiente MATLAB® capaz de adquirir sinais de deslocamentos dinâmicos, por meio do processamento e correlação de imagens digitais tridimensionais, utilizando duas webcams ligadas a um computador. Através da interface computacional proposta é possível, sincronizar e calibrar o par de câmeras, bem como, realizar a conversão das imagens adquiridas, do domínio real para o digital e, posteriormente, realizar o processamento de imagens, mediante a identificação de alvos de interesse e delimitação dos centroides dos mesmos, com o intuito de identificar a posição espacial nos eixos X, Y e Z de objetos submetidos a deslocamentos dinâmicos ao longo de um intervalo de tempo. No presente trabalho, foi realizada a identificação experimental dos deslocamentos pontuais de uma estrutura do tipo frame. Os resultados obtidos apresentam-se satisfatórios uma vez que, os movimentos foram provocados na estrutura foram percebidos e apresentados graficamente.*

PALAVRAS-CHAVE: ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, PROCESSAMENTO DE IMAGENS, CÂMERA FOTOGRÁFICA DIGITAL.

EVALUATION OF THE FREQUENCY SPECTRUM USING CAMERAS AS CONTACT-FREE FREQUENCY SENSORS

ABSTRACT: *This work presents a approaches the study of frequency spectrum in structures subjected to dynamic displacements. Proposing the use of a methodology developed in a MATLAB® environment capable of acquiring dynamic displacement signals, through the processing and correlation of three-dimensional digital images, using two webcams connected to a computer. Through the proposed computational interface, it is possible to synchronize and calibrate the pair of cameras, as well as to carry out the conversion of the acquired images, from the real domain to the digital one and, subsequently, carry out image processing, by identifying targets of interest and delimitation of their centroids, in order to identify the spatial position in the X, Y and Z axes of objects submitted to dynamic displacements over a period of time. In the present work, an experimental identification of the punctual displacements of a frame-type structure was carried out. The results obtained are satisfactory since the movements caused in the structure were perceived and presented graphically.*

KEYWORDS: VIBRATION ANALYSIS, IMAGE PROCESSING, DIGITAL CAMERA.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e aprimoramento constante de técnicas e metodologias, nas mais diversas áreas da engenharia, surgem como resposta à necessidade industrial de aumentar a eficiência e a confiabilidade de equipamentos mecânicos e seus processos. A análise de vibrações mecânicas tem sido empregada nas mais diversas situações e, atualmente, representa uma poderosa ferramenta na detecção de anomalias, prevenção de falhas e predição do comportamento de estruturas inseridas em sistemas dinâmicos presentes em ambientes industriais, corroborando para um alto nível de confiabilidade e robustez de seus equipamentos (SOUZA e LIMA, 2003).

Estruturas mecânicas submetidas a deslocamentos dinâmicos necessitam de monitoramento de sua integridade estrutural, almejando o aumento de sua longevidade, bem como, a mitigação de falhas. Atualmente estão disponíveis dois tipos de sensores para medição de deslocamentos estruturais: os de contato (por exemplo, acelerômetro); e sem contato (por exemplo, sistema de vibrômetro a laser e interferometria de radar).

Os acelerômetros são exemplos de sensores de contato que exigem acesso à estrutura para sua fixação. São também caracterizados por necessitar de conexão física, através de cabos, com o equipamento responsável por receber os sinais captados, pesquisas em desenvolvimento, tais como, a apresentada por Galdino e Cury (2016) estudam a viabilidade de utilização de acelerômetros Wireless para o monitoramento dinâmico de estruturas. Ainda sobre os acelerômetros, outro ponto que deve ser levado em consideração é o fato de que os mesmos são fixados na estrutura sob análise, ocasionando a inserção de massa no sistema. É importante considerar também que a instalação de acelerômetro em estruturas de maior complexidade pode se mostrar demasiadamente arriscada e inviável, tendo em vista que a fixação é efetuada por um operador humano.

Quando analisados sensores sem contato, Kohut et al. (2013) e Nassif et al. (2005) afirmam que o vibrômetro a laser possui um alto grau de confiabilidade e precisão. Entretanto, limitações relacionadas à distância de medição impedem que ele seja aplicado em larga escalada para monitoramento de estruturas localizadas longe do sistema de emissão de laser. Nesse caso, a necessidade de utilização de um feixe de laser de alta intensidade comprometeria a saúde humana. Segundo Gentile et al. (2009), o sistema de radar interferométrico possibilita medições remotas com uma boa resolução, mas, em contra partida, exige a montagem de superfícies reflexivas na estrutura a ser analisada.

Nesse contexto, Feng (2016) afirma que sistemas de medição de deslocamento baseados em sistemas de aquisição de imagens, que utilizam câmeras como sensores sem contato e extraem deslocamentos de imagens de vídeo por meio das técnicas de correspondência de modelos, atraíram

interesses de pesquisa significativos e ofereceram uma alternativa promissora aos sensores de deslocamento convencionais.

Para Takahama (2019), a utilização de câmeras como sensor tem despertado grande interesse na comunidade científica, devido ao potencial da qualidade de obtenção de imagens e taxa de amostragem, garantindo uma boa resolução espacial e temporal. Estas características permitem a análise em bandas de frequência cada vez maiores, com capacidade de discretização temporal e espacial cada vez menores. Além disso, esse método de medição, assim como a medição utilizando sensores a laser, não requer contato físico com a estrutura durante a aquisição dos dados e permite a análise de vários pontos concomitantemente.

Nesse contexto, o presente trabalho desenvolve-se da vertente de pesquisa que vem, ao longo dos anos, abordando o estudo de frequências em estruturas submetidas a deslocamentos dinâmicos, que permite a identificação e aquisição de dados de deslocamento de estruturas utilizando câmeras como sensores sem contato.

A metodologia apresentada não se restringe apenas a equipamentos mecânicos instalados em ambiente fabril, podendo ser empregada nas mais diversas áreas da engenharia. Um exemplo é o trabalho de Feng (2016), que aborda o estudo de estruturas de engenharia civil, incluindo edifícios e pontes expostas a várias cargas externas (como tráfego, vento e terremoto) durante a vida útil operacional, com o intuito de fornecer informações quantitativas para avaliações de segurança estrutural e para fins de manutenção.

Além do apelo econômico, a utilização de sensores sem contato representa uma técnica que oferece maior segurança ao operador, visto que não há contato direto do operador com a estrutura ou objeto analisado. A captura da cena que será analisada permite a alteração dos pontos de interesse (alvos) ainda na etapa de processamento, sem a necessidade de realizar nova captura de imagens, representando ganho de tempo durante a análise.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem o intuito de verificar a eficácia da utilização de câmeras fotográficas como sensores sem contato para identificação de deslocamentos de um ou vários alvos em imagens digitais tridimensionais e, para tanto, foram utilizadas 2 (duas) webcams conectadas a um computador. Os dados foram adquiridos e processados através de rotinas desenvolvidas ambiente Matlab®.

Os estudos foram realizados em uma estrutura experimental composta por 3 (três) patamares estruturais e interligados entre si e a base por lâminas de aço, conforme ilustrado na Figura 1. Em cada um dos patamares foram fixados alvos, que foram utilizados como referência para a análise.

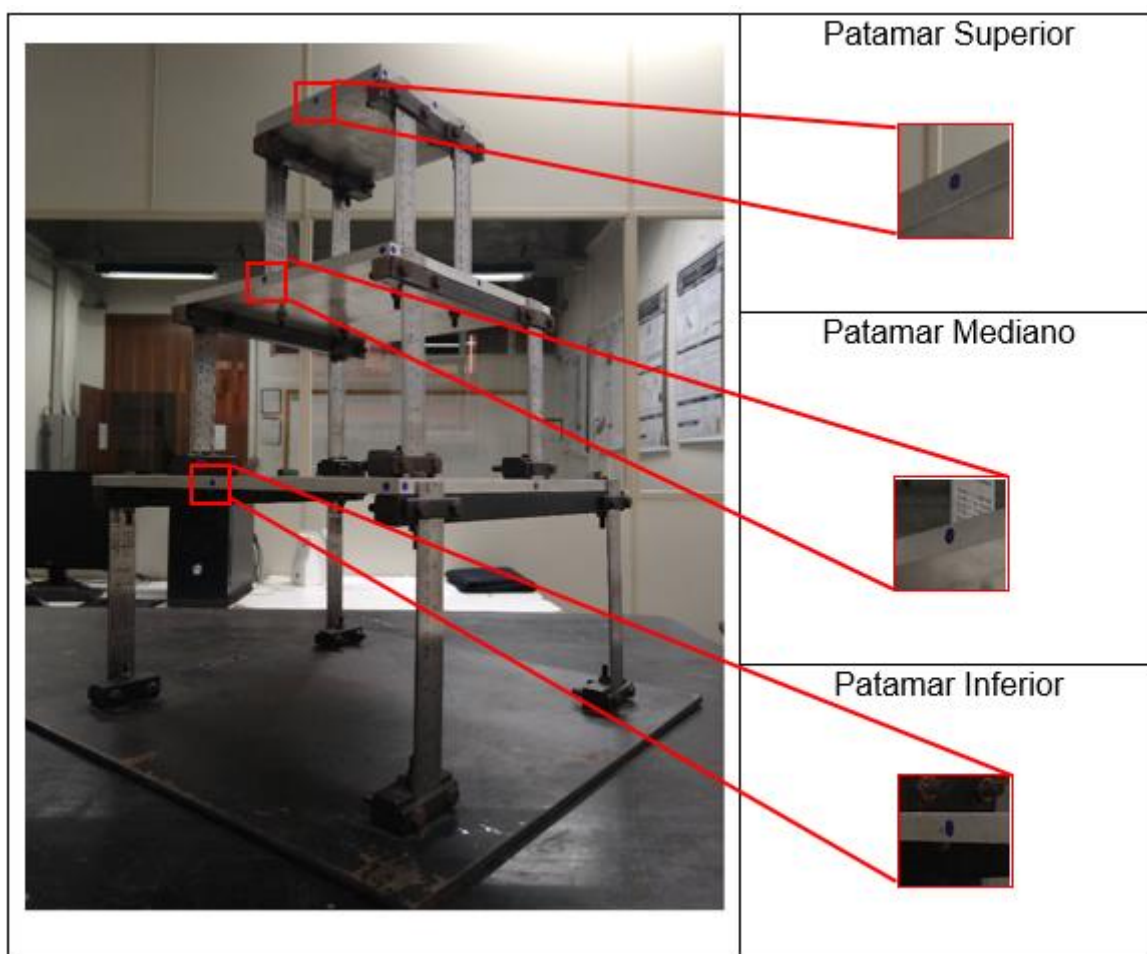


FIGURA 1. Estrutura experimental. Fonte: Autoria Própria (2020).

Todo o processo de captura e processamento das imagens foi feito no *software Visual Object Detector by Computational Analysis (VODCA)*, fruto do trabalho desenvolvido por Takamaha (2019), com contribuições de Rissá (2017), Berton Junior (2016), Leonardi (2015) e Simão(2020). O *software* é dividido entre rotinas de pré-processamento e pós-processamento das imagens. Dentro das ações realizadas dentro da rotina de pré-processamento, é importante destacar a sincronização e a calibração, que, permitem a captura das imagens pelas duas câmeras, de forma a conciliar as informações adquiridas por cada câmera isoladamente, por meio da marcação temporal e espacial dos frames existentes no campo de visão das mesmas.

O princípio da calibração se norteia pela identificação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos do par de câmeras, por meio da aquisição de imagens de um padrão geométrico, construído de maneira similar a um tabuleiro de xadrez. Em uma sub-rotina desenvolvida no trabalho de Bouguet (2013), as imagens são analisadas, para que seja possível a identificação das intersecções

das arestas dos quadrados existentes no padrão, que deve permanecer no campo de visão de ambas as câmeras, conforme mostrado na Figura 2.



FIGURA 2. Identificação das intersecções do padrão tabuleiro câmera 1 e câmera 2. Fonte: Autoria Própria (2020).

A *toolbox* de calibração de câmeras (*Stereo Camera Calibrator*), disponível no *software* MATLAB®, foi implementada por Bouguet (2013). Baseada no método de otimização do gradiente descendente proposto por Zhang (2000), ela possibilita a obtenção dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras. Informações detalhadas sobre esses parâmetros podem ser encontrados no trabalho de Takahama (2019).

Com o par de câmeras calibrados, é possível realizar a aquisição das imagens e iniciar as rotinas de pós-processamento, que contemplam a Identificação dos alvos de interesse, delimitação do centroide desses alvos e a obtenção do movimento percebido através da Correlação de Imagem Digital 3D (*Digital Image Correlation – 3D DIC*), que possibilita realizar a estimativa da posição do alvo analisado através da observação de seu movimento no espaço X, Y e Z. No caso em tela, a obtenção da posição do alvo ocorre através da triangulação de um par de imagens, atendendo os requisitos do modelo analítico inverso proposto por Xue (2017).

O ensaio consistiu na excitação da estrutura através do martelo de impacto e o deslocamento exercido foi capturado pelas câmeras com uma taxa média de 29,99 *frames* por segundo. Foram utilizadas webcams do modelo C920, da marca Logitech, com sensores CMOS, ligadas a um *notebook*, conforme ilustrado na Figura 3.

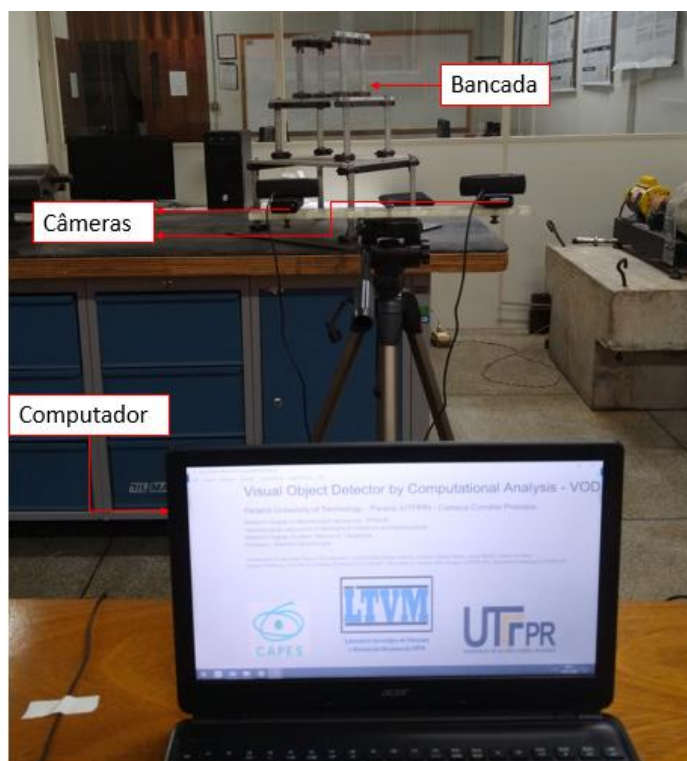


FIGURA 3. Set up experimental da metodologia proposta. Fonte: Autoria Própria (2020).

Para análise foram utilizados cerca de 140 *frames* capturados durante a excitação da bancada, equivalente a cerca de 4,66 segundos de filmagem. Tendo em vista que, durante a realização do experimento, foi possível observar que a entrada impulsiva gerada pelo martelo de impacto gerou uma perturbação de pequena amplitude, a bancada manteve-se em movimento por um curto período de tempo, retornando a condição estática devido ao amortecimento.

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos pela metodologia que utiliza câmeras como sensores sem contato para analisar o deslocamento de um alvo fixo em uma estrutura experimental. A Figura 4 ilustra os deslocamentos mensurados nos eixos X, Y e Z do patamar inferior, respectivamente.

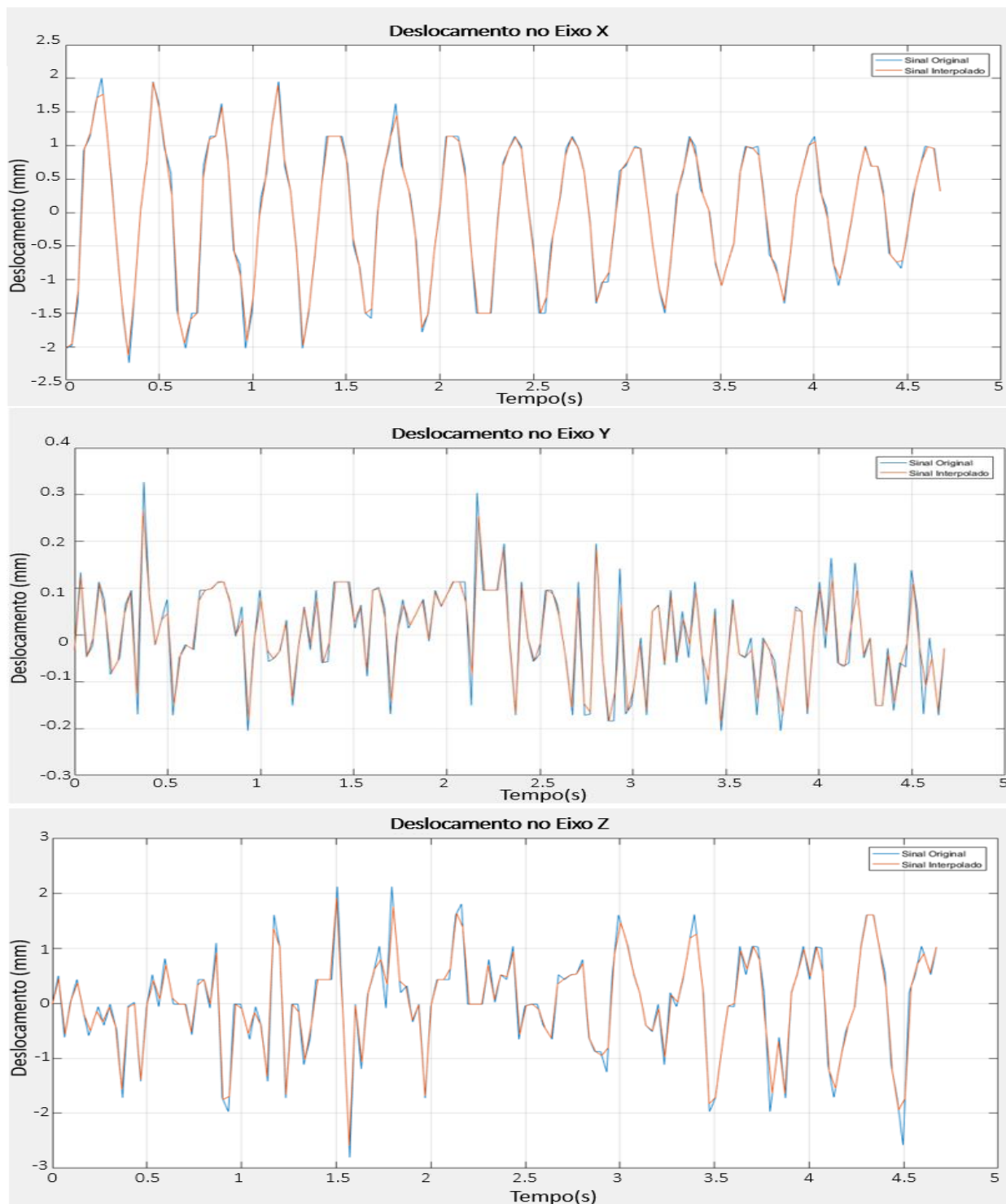


FIGURA 4. Deslocamento alvo eixos X, Y e Z. Fonte: Autoria Própria (2020).

No gráfico de deslocamento do eixo X é possível observar o comportamento identificado pelo *software* VODCA, após a perturbação provocada na estrutura experimental. Conforme evidenciado nos segundos iniciais da análise, é perceptível o deslocamento em maior amplitude, que vai se

dissipando e tendendo a zero, devido ao amortecimento ao longo do tempo. Comportamento esse esperado para análise de uma estrutura excitada por um único impulso.

Já nos gráficos do deslocamento nos eixos Y e Z, é visível que o comportamento não foi tão definido quanto o deslocamento percebido no eixo X. Atribui-se esse comportamento a duas circunstâncias: primeiro, a baixa amplitude de deslocamento a qual a bancada foi submetida, por meio do impulso com o martelo nestas direções; segundo, as características construtivas da própria bancada, que propiciam maior deslocamento no eixo X, quando comparado aos demais eixos. Assim, os deslocamentos percebidos pelas câmeras nas direções (Y e Z) tornam-se próximos ao deslocamento em torno de um único pixel e, desta forma, tende ser identificado como um ruído.

O presente trabalho propôs uma metodologia de aquisição de imagens, que possibilita a identificação do deslocamento de uma bancada construída com três patamares estruturais e sujeita a deslocamentos dinâmicos. Conforme evidenciado nos gráficos da Figura 4 foi possível identificar o deslocamento provocado na estrutura. Trabalhos futuros poderão abordar a possibilidade de se mensurar o deslocamento em identificado.

REFERÊNCIAS

BERTON JUNIOR, J. Medida de deslocamento em 2D e 3D utilizando câmera digital como sensor sem contato. 2016. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2016.

BOUGUET, J. Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab, Computational Vision. at the California Institute of Technology. 2013. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html>. Acesso em 22 setembro 2020

FENG, D. Advanced Vision-Based Displacement Sensors for Structural Health Monitoring. 2016. 170f. Tese Doutorado. Columbia University. 2016.

GALDINO, E.; CURY, A. Development of low-cost wireless accelerometer for structural dynamic monitoring. CILAMCE. 2016.

KOHUT, P.; HOLAK, K.; et al. Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements. Structural Health Monitoring. v. 12, p. 411-429, 2013.

LEONARDI, D. M. Medida de deslocamentos e vibrações utilizando uma câmera digital como sensor sem contato. 2015. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

NASSIF, H. H.; GINDY, M.; DAVIS, J. Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration. NDT & E International. v. 38, p. 213-218, 2005.



RISSÁ, H. S. Identificação de deslocamentos de baixa amplitude e frequência utilizando uma câmera digital. 2017; 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

SIMÃO, J. E. L. “Análise modal utilizando câmeras fotográficas como sensores de frequência sem contato”. 2020. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

SOUZA, S. S.; LIMA, C. R. C. “Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta estratégica”. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP, Ouro Preto-MG, 2003.

TAKAHAMA, M. H. Avaliação do Espectro de Frequência de Medidas de Correlação de Imagem Digital Tridimensional Utilizando Câmeras de Baixo Custo. 2019. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

XUE, Y. et al. High-accuracy and real-time 3D positioning, tracking system for medical imaging applications based on 3D digital image correlation. Optics and Lasers in Engineering, v. 88, p. 82-90, 2017.

ZHANG, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. v. 22, p. 1330–1334, 2000.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o Prof. Dr. Adailton Silva Borges pela orientação intelectual, bem como, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Cornélio Procópio pelo suporte material que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.