

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA –
PPGEM-CP

JOSÉ EDUARDO DE LIMA SIMÃO

**ANÁLISE MODAL UTILIZANDO CÂMERAS FOTOGRÁFICAS COMO
SENSORES DE FREQUÊNCIA SEM CONTATO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

JOSÉ EDUARDO DE LIMA SIMÃO

**ANÁLISE MODAL UTILIZANDO CÂMERAS FOTOGRÁFICAS COMO
SENSORES DE FREQUÊNCIA SEM CONTATO**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Adailton Silva Borges

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S593 Simão, José Eduardo de Lima

Análise modal utilizando câmeras fotográficas como sensores de frequência sem contato / José Eduardo de Lima Simão. – 2020.

77 p. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: Adailton Silva Borges.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2020.

Bibliografia: p. 63-70.

1. Análise modal. 2. Vibração. 3. Processamento de imagens. 4. Câmeras fotográficas digitais. 5. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Borges, Adailton Silva, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Bibliotecário/Documentalista responsável:
Romeu Righetti de Araujo – CRB-9/1676



Título da Dissertação Nº 50:

“ANÁLISE MODAL UTILIZANDO CÂMERAS FOTOGRAFICAS COMO SENSORES DE FREQUÊNCIA SEM CONTATO”.

Por

José Eduardo de Lima Simão

Orientador: **Prof. Dr. Adailton Silva Borges**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, linha de pesquisa: **Sistemas Dinâmicos**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 09h00min do dia 02 de setembro de 2020. O trabalho foi _____ pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof.Dr. Adailton Silva Borges
(Orientador – UTFPR-CP)

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Ricardo Breganon
(IFPR-Jacarezinho)

Dedico este trabalho à minha família e a Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças e convicção para concluir este trabalho.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Adailton da Silva Borges, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, pela paciência e amizade durante os momentos de dificuldades.

Aos companheiros de laboratório, em especial aos amigos Marcos Hiroshi Takahama e Wanderlei Malaquias, pelo incentivo e pela ávida ajuda, sem as quais, não teria conseguido finalizar este trabalho.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do câmpus Cornélio Procópio da UTFPR, pelo amadurecimento acadêmico e conhecimento oferecido durante a realização do curso de mestrado.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha família, de maneira especial à minha mãe Lúcia Helena de Lima Simão, pelo incentivo, apoio e paciência dispendidos durante a realização do curso.

À minha esposa Jéssica Costa Mendes, pela compreensão, dedicação e amor, e por sempre me apoiar em todas as situações.

E à minha irmã Thaís Helena de Lima Simão, pelo carinho e por toda a ajuda.

RESUMO

SIMÃO, José Eduardo de Lima. **ANÁLISE MODAL UTILIZANDO CÂMERAS FOTOGRÁFICAS COMO SENSORES DE FREQUÊNCIA SEM CONTATO**. 2020. 77 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2020.

O presente trabalho propõe uma metodologia capaz de adquirir sinais de deslocamentos dinâmicos, por meio do processamento e correlação de imagens digitais tridimensionais, por meio de duas *webcams* ligadas a um computador. A interface computacional proposta pela metodologia permite a conversão da imagem adquirida, do domínio real para o digital e, posteriormente, o pós-processamento de imagens, a fim de identificar a posição espacial de objetos submetidos a deslocamentos dinâmicos. No presente trabalho, foi realizada a identificação experimental dos parâmetros modais de uma estrutura do tipo *frame*. O procedimento utilizando câmeras foi dividido em etapas de pré-processamento, calibração e aquisição do vídeo, e pós-processamento, cálculo da posição do objeto, por meio da correlação das imagens. Os dados obtidos através das metodologias clássica, utilizando acelerômetros e martelo instrumentado, e da presente proposta, foram usados para realização da análise modal da estrutura, com a finalidade de avaliar a utilização de câmeras como uma alternativa viável na identificação dos parâmetros estruturais, e apresentaram a divergência de 1,30% em seus resultados.

Palavras-chave: Análise Modal Experimental. Análise de Vibração. Processamento de Imagens. Câmera Fotográfica Digital.

ABSTRACT

SIMÃO, José Eduardo de Lima. **MODAL ANALYSIS USING PHOTOGRAPHIC CAMERAS AS CONTACT-FREE FREQUENCY SENSORS.** 2020. 77 f. Dissertation (Master degree) - Post-Graduation Program in Mechanical Engineering, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

This work presents a methodology to obtain the dynamic displacement signals through the processing and correlation of three-dimensional digital images, through two webcams connected to a computer. The computational interface proposed by the methodology allows the conversion of the acquired image, from the analog to the digital domain and later the location of the position of objects subjected to dynamic displacements. In the present work, It was performed experimental identification of modal parameters of a structure of the frame type. The procedure using cameras is divided into stages of pre-processing, calibration and acquisition of video, and post-processing, calculating the position of the object through the correlation of images. The data obtained through the classical methodologies, using accelerometers and instrumented hammer, and the present proposal, were used to carry out the modal analysis of the structure, with the purpose of evaluating the use of cameras as a viable alternative in the identification of the structural parameters, and presented the 1.30% difference in results.

Keywords: Experimental modal analysis. Vibration Analysis. Image Processing. Digital Camera.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução da análise de vibrações	14
Figura 3.1 – Componentes de uma câmera digital	18
Figura 3.2 – Arquitetura de uma câmera compacta	18
Figura 3.3 – Detalhe interno do conjunto de lentes	19
Figura 3.4 – (a) Imagem Linear, (b) Efeito almofada e (c) Efeito barril	20
Figura 3.5 – Representação da Imagem Digital em forma de matriz	21
Figura 3.6 – Espectro de Cores RGB	22
Figura 3.7 – Conversão de uma imagem Analógica para Digital e decomposição em cada camada de cor em cada matriz	23
Figura 3.8 – Identificação das intersecções do padrão de tabuleiro (a) câmera 1 e (b) câmera 2	24
Figura 3.9 – (a) Imagem original (RGB) e (b) imagem após uso do limiar de corte (<i>Thresholding</i>)	27
Figura 3.10 – Seleção de uma intensidade de cor no canal B	28
Figura 3.11 – Processo de subtração do alvo da imagem	28
Figura 3.12 – Determinação da organização dos alvos	29
Figura 3.13 – Correlação da Posição dos centroides em cada <i>frame</i>	30
Figura 3.14 – Fluxograma de Pré-Processamento e Pós-Processamento de imagens	31
Figura 4.1 – Estrutura Experimental (Solidworks®)	36
Figura 4.2 – Aparato Experimental do Método Clássico	38
Figura 4.3 – FRF(s) - (a) acelerômetro posicionado no patamar 1; (b) acelerômetro posicionado no patamar 2 e (c) acelerômetro posicionado no patamar 3.....	39
Figura 4.4 – <i>Set up</i> experimental da metodologia proposta	41
Figura 4.5 – Padrão Tabuleiro (a) lado esquerdo, (b) lado direito	42
Figura 4.6 – Posições Padrão Tabuleiro no processo de calibração	43
Figura 4.7 – Média de Erro Calibração	43
Figura 4.8 – Estrutura Experimental	44
Figura 4.9 – Deslocamento X, Y e Z patamar inferior	45
Figura 4.10 – Picos de Frequência patamar inferior	47
Figura 4.11 – Deslocamento X, Y e Z patamar mediano	47
Figura 4.12 – Picos de Frequência patamar mediano	49
Figura 4.13 – Deslocamento X, Y e Z patamar superior	49
Figura 4.14 – Picos de Frequência patamar superior	51

Figura 4.15 – Densidades Espectrais, (a) densidade espectral de potência, (b) e (c) densidade espectral cruzada	52
Figura 4.16 – Decomposição de valores singulares e decaimento logaritmo do primeiro modo de vibrar	54
Figura 4.17 – Decomposição de valores singulares e decaimento logaritmo do segundo modo de vibrar.....	54
Figura 4.18 – Correlação MAC	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Picos de Frequência da Metodologia Proposta	52
Tabela 2 – Comparação de Resultados	55

LISTA DE ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

$\{\Phi_i^a\}$ – Vetor modal simulado referente ao modo i

$\{\Phi_j^e\}$ – Vetor modal simulado referente ao modo j

ANPSD – Média normalizada da densidade espectral de potência

BFD – Método básico no domínio da frequência

CMOS – *Complementary metal-oxide semiconductor* (Semicondutor de metal-óxido complementar)

CMYK - *Cyan, Magenta, Yellow and Black* (Ciano, Magenta, Amarelo e Preto)

DDF – Decomposição no domínio da frequência

DIC – *Digital image correlation* (Correlação de imagem digital)

EMA – *Experimental modal analysis* (Análise modal experimental)

FDD – Método de decomposição no domínio da frequência

FFT – *Fast fourier transform* (Transformada rápida de fourier)

FRF – Função de resposta em frequência

Fps – *Frames* por segundo

g – Gravidade

HSL - *Hue, Saturation and Lightness* (Matiz, Saturação e Luminosidade)

HSV - *Hue, Saturation and Value* (Matiz, Saturação e Valor)

Hz – Hertz

Kg – Quilograma

m – Metro

MAC – *Modal assurance criterion* (Coeficiente de correlação modal)

mm – Milímetro

mV – Milivolts

N – Newton

PP – *Peak Picking* (seleção de pico)

PSD – *Power spectral density* (Densidade espectral de potência)

s – Segundo

SSI – Identificação estocástica de subespaço

SDV – Decomposição em valores singulares

RGB – *Red, Green and Blue* (Vermelho, Verde e Azul)

VODCA – *Visual Object Detector by Computational Analysis* (Detecção de Objeto Visual por Análise Computacional)

YUV – Sistema de Cores (Luminância e crominância)

3D – Três dimensões

p – Posição do alvo

x_0 – Intensidade de cor do alvo

δ – Distância entre as posições dos alvos

ε – Erro

σ – Desvio padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVAS.....	17
2 OBJETIVO GERAL	20
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1 CÂMERA DIGITAL	21
3.1.1 Lentes	23
3.1.2 Sensores.....	24
3.1.3 Modelos de Cores de Captação e Armazenamento	25
3.2 CALIBRAÇÃO	27
3.2.1 Padrão Geométrico	27
3.3 AQUISIÇÃO DE IMAGENS	29
3.3.1 Marcação Temporal	29
3.4 PÓS-PROCESSAMENTO DA IMAGEM	30
3.4.1 Identificação do alvo	31
3.4.2 Identificação do centroide do alvo	33
3.4.3 Análise e obtenção de frequência	34
3.5 ANÁLISE MODAL.....	36
3.5.1 Coeficiente MAC	38
4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS	40
4.1 EXPERIMENTO 1 – AQUISIÇÃO DE DADOS DE FREQUÊNCIA DE UMA ESTRUTURA UTILIZANDO ACELERÔMETROS.....	40
4.2 EXPERIMENTO 2 – AQUISIÇÃO DE DADOS DE FREQUÊNCIA DE UMA ESTRUTURA UTILIZANDO CÂMERAS	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA METODOLOGIA	71

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) estudados por Nassif et al. (2005), Gentile e Bernardini (2009), Fukuda et al. (2010), Casciati e Fuggini (2011), Casciati e Wu, Fukuda et al. e Kohut et al. (2013) e Ribeiro et al. (2014).

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 (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. Trabalhos como de Gehle (1998), de Wabben (2003), de Lee (2006), de Ji (2008), de Caetano (2011), de Kim (2013) e de Wu (2014) abordam esse tema.

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.

Nos trabalhos de Fukuda (2010) e Ribeiro (2014) são apresentados resultados da utilização de câmeras para monitoramento de estruturas de grande porte na engenharia civil. Ribeiro (2014) faz ainda uma análise sobre a relação da distância da estrutura analisada e a precisão da medição dos deslocamentos.

Já Kohut *et al.* (2013) apresenta a comparação de dois métodos de medição, sem contato, dedicados à análise de estruturas (Interferômetro de Radar e Câmeras). O método baseado na análise de imagens calcula o campo de deslocamento da estrutura analisada, por meio do coeficiente de correlação da imagem digital. Um segundo sistema mede a deflexão das estruturas, por meio de um interferômetro de radar. Os resultados obtidos apresentaram nível de correlação de 99,96.

Shang *et al.* (2014), Kumari (2015) e Park (2015) abordam o monitoramento constante da deformação de estruturas. Por sua vez, Beberniss (2017) demonstrou a

eficiência e precisão oferecida pela técnica que utiliza um conjunto de câmeras com o processamento de imagens, possibilitando mensurar pequenos deslocamentos, assim como a técnica que utiliza sensores a laser. A aplicação de processamento de imagens de Park *et al.* (2015) é um outro exemplo de monitoramento do movimento de estruturas, de forma precisa e com alta taxa de amostragem, através da utilização do sistema de captura de movimento (Motion Capture System – MCS).

Em seus trabalhos, Sabino (2013) e Leonardi (2015) descrevem detalhadamente técnicas de processamento de imagens, como: separação de cores, detecção de bordas, segmentação e operações morfológicas. Complementando os trabalhos anteriores (Sabino (2013) e Leonardi (2015)), Berton Junior (2016) demonstrou, através de um par de câmeras, a capacidade de estimar medidas da posição de um alvo no espaço, em 3 dimensões. Rissá (2017) utilizou câmeras de baixo custo e a técnica de processamento de imagens para identificar deslocamentos de baixa frequência.

Indubitavelmente cada autor elabora, com base nos equipamentos disponíveis e objetivos pretendidos, a metodologia e o código de algoritmo a ser empregado. No trabalho em questão, será utilizado o algoritmo desenvolvido no Laboratório Tecnológico de Vibrações e Manutenção Mecânica da UTFPR, que utiliza, para aquisição e processamento dos dados obtidos, basicamente 2 *webcams* e um computador. O *software Visual Object Detector by Computational Analysis (VODCA)* almeja apresentar uma solução prática e de baixo custo para análise de estruturas, fruto do trabalho desenvolvido por Takamaha (2019), com contribuições de Rissá (2017), Berton Junior (2016) e Leonardi (2015). Neste trabalho, o algoritmo foi empregado em experimentos diferentes ao de Takahama (2019), com o intuito de assegurar a confiabilidade e exatidão do mesmo.

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.

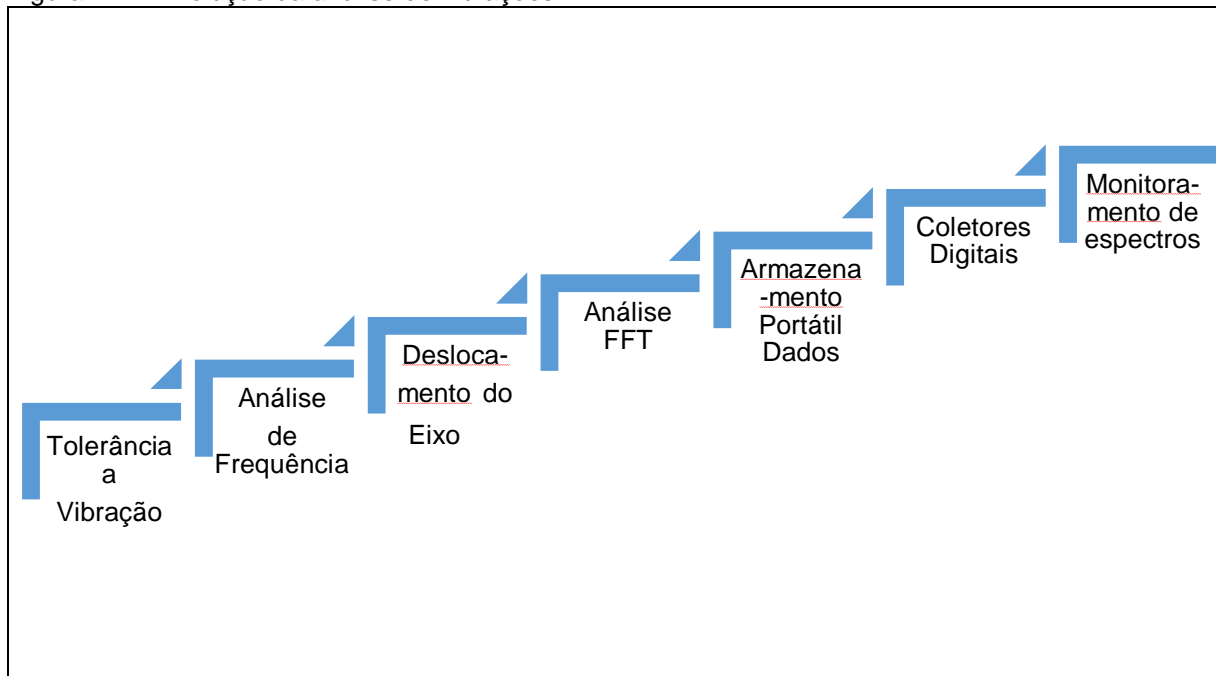
1.1 JUSTIFICATIVAS

Muitos atribuem o início da era moderna da medição de vibração industrial a T.C. Rathbone. O então engenheiro-chefe da Divisão de Turbinas e Máquinas da empresa

norte americana *Fidelity and Casualty Company*, situada em Nova York, foi responsável pela criação das primeiras diretrizes de avaliação da condição da máquina, a partir de medições de vibração, em um artigo publicado em 1939. O artigo intitulado "Tolerância à vibração" forneceu um guia para avaliação de condições, com base no deslocamento da vibração de aproximadamente 60 RPM (1 Hz) a 7.200 RPM (120 Hz) (MITCHELL, 2008).

Em seu trabalho, Mitchell (2008) traçou uma linha do tempo contendo a evolução cronológica dos avanços na área de análise de vibrações, enfatizando também os avanços significativos da era digital e do armazenamento e processamento de dados, no que concerne à medição como monitoramento. A evolução descrita por Mitchell pode ser observada de maneira simplificada na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Evolução da análise de vibrações.



Fonte: Adaptado Mitchell (2008).

Os trabalhos desenvolvidos por Sabino (2013), Park *et al.* (2015), Bartilson, Wieghaus e Hurlebaus (2015), Leonardi (2015), Berton Junior (2016) Feng (2016), Beberniss (2017), Rissá (2017) e Takahama (2019), corroboram a ideia disseminada por Mitchell (2008), de que a era digital e o processamento de dados possibilitaria o avanço no estudo de análise de vibrações.

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. Ainda segundo Feng (2016), o monitoramento de deslocamentos estáticos e dinâmicos estruturais pode fornecer informações quantitativas para avaliações de segurança estrutural e para fins de manutenção. Por outro lado, Feng (2016) também afirma que a utilização de sensores com contato pode encarecer a prática, principalmente devido à instalação complexa, demorada e ao valor elevado de sensores e seus sistemas de aquisição de dados.

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 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar e validar a metodologia implementada na interface de Detecção de Objeto Visual por Análise Computacional (*Visual Object Detector by Computational Analysis – VODCA*), que propõe a possibilidade de identificar e caracterizar o deslocamento dinâmico de um objeto em movimento, por meio da técnica de correlação de imagem digital tridimensional. Ao final, por meio da análise modal utilizando apenas a resposta, serão obtidos os parâmetros modais de uma estrutura do tipo *frame*.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar ajustes necessários aos algoritmos de detecção contidos na interface do *Visual Object Detector by Computacional Analysis*, para possibilitar a identificação dos alvos e posterior processamento das imagens;
- Estabelecer procedimentos para a realização dos experimentos;
- Realizar aquisição de dados, utilizando sensores de contato (acelerômetro);
- Realizar experimentos utilizando o *Visual Object Detector by Computacional Analysis*;
- Comparar os dados adquiridos pela metodologia proposta, através do *Visual Object Detector by Computacional Analysis*, com os obtidos com os sensores de contato (acelerômetro);
- Realizar duas análises modais da estrutura, sendo uma com os dados adquiridos a partir do par de câmeras, e outra com base nos dados obtidos através dos acelerômetros, comparando os resultados modais identificados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos primários utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho, dessa forma são abordados os conceitos fundamentais relacionados à composição e funcionamento de câmeras digitais compactas, etapas e procedimentos relacionados ao pré-processamento e ao pós processamento das imagens.

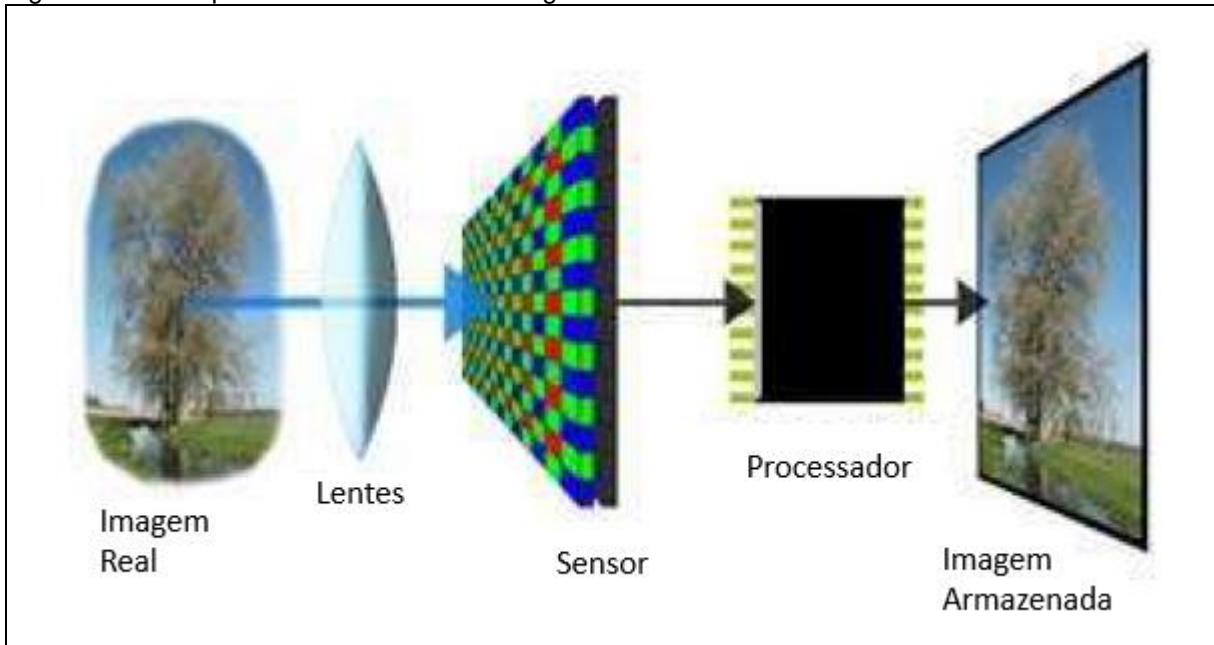
3.1 CÂMERA DIGITAL

O conceito de câmera digital passou por uma série de aperfeiçoamentos desde sua concepção. Técnicas de processamento de imagens que possibilitam o reconhecimento de padrões são empregadas para melhorar a interação do usuário com o equipamento, oferecendo funcionalidades como focalização automática, estabilizador de vibração, ajuste automático de brilho e contraste, impactando diretamente na qualidade da imagem obtida. Além dos aspectos mencionados, tecnologias como o reconhecimento de padrões permitem a identificação de faces e suas expressões instantaneamente. Dado o potencial embarcado às atuais câmeras digitais podem ser utilizadas em uma vasta gama de possibilidades.

Constituída fisicamente por lentes que atuam simultaneamente com componentes eletrônicos (sensor de captura de luminosidade, processador e mídia de armazenamento de dados), as câmeras digitais necessitam da perfeita integração de seus componentes físicos e eletrônicos para seu correto funcionamento e para que as imagens obtidas sejam de alta qualidade.

Seguindo essa linha, Berton Junior (2016) afirma que, em todas as câmeras digitais, o processo de transformação de uma imagem real (imagem analógica) para o domínio virtual (imagem digital), essencialmente necessita da utilização dos componentes ilustrados na Figura 3.1.

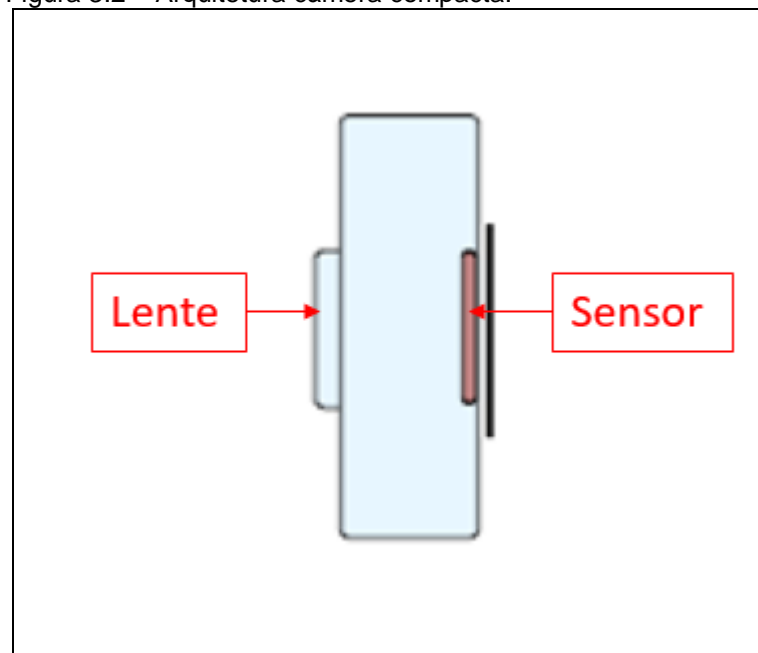
Figura 3.1 – Componentes de uma câmera digital.



Fonte: Adaptado de BERTON JUNIOR (2016).

Na realização deste trabalho foram utilizadas *webcams*, cuja característica construtiva pode ser observada na Figura 3.2. Conforme ilustrado, a câmera é composta apenas pela lente e sensor, sendo o processamento e armazenamento da imagem realizado pelo computador onde a câmera está conectada.

Figura 3.2 – Arquitetura câmera compacta.



Fonte: Adaptado de Maitre, 2015.

3.1.1 Lentes

Ao capturar uma imagem através de uma câmera digital, seja ela compacta ou complexa, as lentes são o primeiro elemento construtivo a ter contato com a luz refletida ou emitida pelo cenário a ser capturado, conforme ilustrado pela Figura 3.1.

Nas câmeras compactas, existe apenas uma lente acoplada, entretanto, existem câmeras compostas por conjuntos de lentes ajustadas por complexos mecanismos, como mostrado na imagem em corte da Figura 3.3.

Figura 3.3 – Detalhe interno do conjunto de lentes.

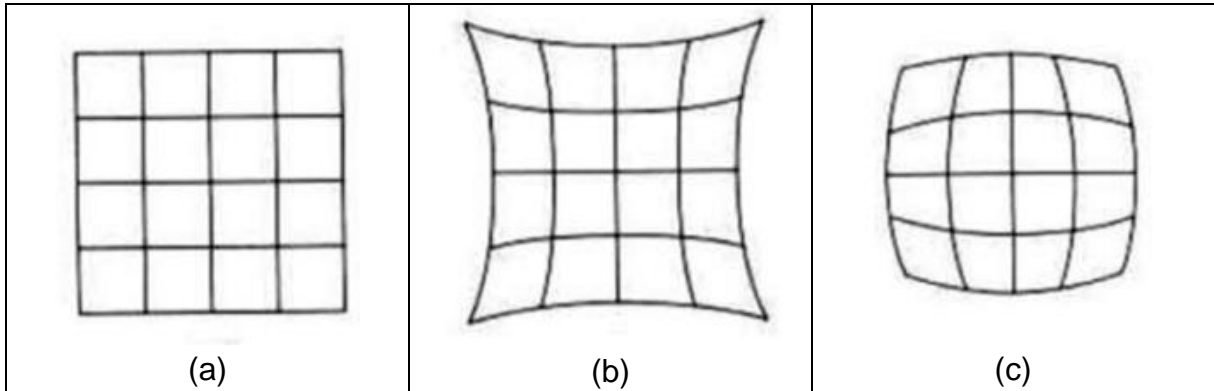


Fonte: TROTTA (2011).

Por conta de imperfeições durante o processo de fabricação e também da natureza construtiva das lentes, é comum que as imagens, principalmente de câmeras mais simples, apresentem distorções. Tanto Berton Junior (2016) como Leonardi (2015) apresentam técnicas detalhadas para mitigar os dois tipos de distorções existentes: a radial e a tangencial. A correta observância e entendimento dessa interferência é de suma importância, tendo em vista que as imagens capturadas

através de lentes podem apresentar distorções devido a suas imperfeições, podendo ocasionar erros significativos durante o pós-processamento das imagens. Um exemplo de distorção descrita por Lobão (2004), e presente em boa parte das câmeras comerciais, é a radial, cuja detecção é possível através de dois efeitos denominados almofada e barril, conforme ilustrado nas Figuras 3.4 (b) e 3.4 (c), respectivamente.

Figura 3.4 – (a) Imagem linear; (b) Efeito almofada; e (c) Efeito barril.



Fonte: BERTON JUNIOR (2016).

As lentes são responsáveis para a convergência de luz para o sensor. Em sequência, o sensor é responsável pela transformação da intensidade de luz do domínio contínuo para o discreto, e, por último, o processador organiza as informações no domínio discreto, para realizar o armazenamento das informações (TAKAHAMA, 2019).

3.1.2 Sensores

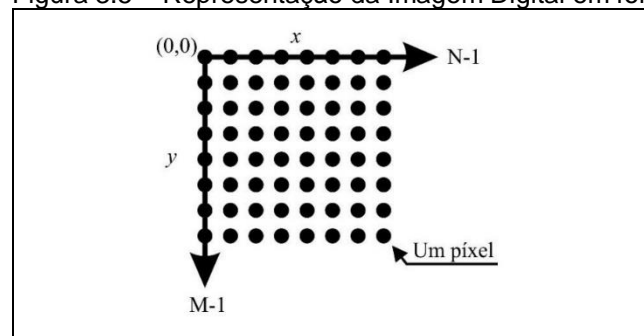
Os sensores que “enxergam” uma imagem podem ser entendidos como uma matriz $M \times N$, na qual cada elemento é um micro sensor de luz, que recebe um sinal luminoso, que será convertido em sinal elétrico. Cada elemento da matriz contém um valor digital proporcional à intensidade luminosa sofrida naquela posição. Cada posição recebe o nome de *pixel* (uma abreviação para *Picture Element*) e representa a menor informação em uma imagem (SABINO, 2013).

Simbolicamente pode-se dizer que as linhas e colunas dessa matriz são compostas por sensores fotossensíveis, denominados APS (*active pixel sensor*). Atualmente existem dois tipos de sensores: o CCD (*charge coupled device*), e o CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*). Segundo Aptina (2010), a

principal diferença entre os dois sensores é a forma como a energia luminosa é transmitida à camada sensível a luminosidade, chamada de “substrato”, onde a energia luminosa é convertida em energia elétrica.

Vale ressaltar ainda que os dois sensores realizam o armazenamento das imagens capturadas em uma matriz, onde cada elemento representa um *pixel* de valor correspondente a sua própria intensidade luminosa. A Figura 3.5 representa esquematicamente a formação desta matriz, mostrando a origem e direção da disposição dos microssensores ou *pixels*.

Figura 3.5 – Representação da Imagem Digital em forma de matriz.



Fonte: SABINO (2013).

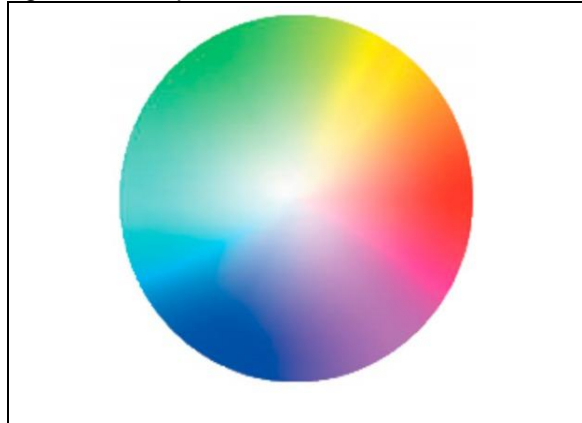
3.1.3 Modelos de Cores de Captação e Armazenamento

A transmissão e armazenamento dos dados digitalizados recebidos pelos sensores é feita através de um sistema de cores, a exemplo do RGB, YUV, CMYK, HSV, HSL entre outros.

Por apresentar uma forma mais simples de armazenamento e tratamento da informação, no presente trabalho foi utilizado o sistema RGB (*red, green, blue*). Obtida após a leitura do sinal digital, a escala RGB é capaz de caracterizar, através das cores primárias (vermelho, verde e azul), as demais cores, com base apenas no valor de intensidade luminosa para cada *pixel*. Nesse contexto, o valor de intensidade em cada *pixel* varia de 0 a 255, conforme descrito no trabalho de Gonzalez & Woods (2000).

Na Figura 3.6, é possível observar o espectro de cores do sistema RGB.

Figura 3.6 - Espectro de cores RGB

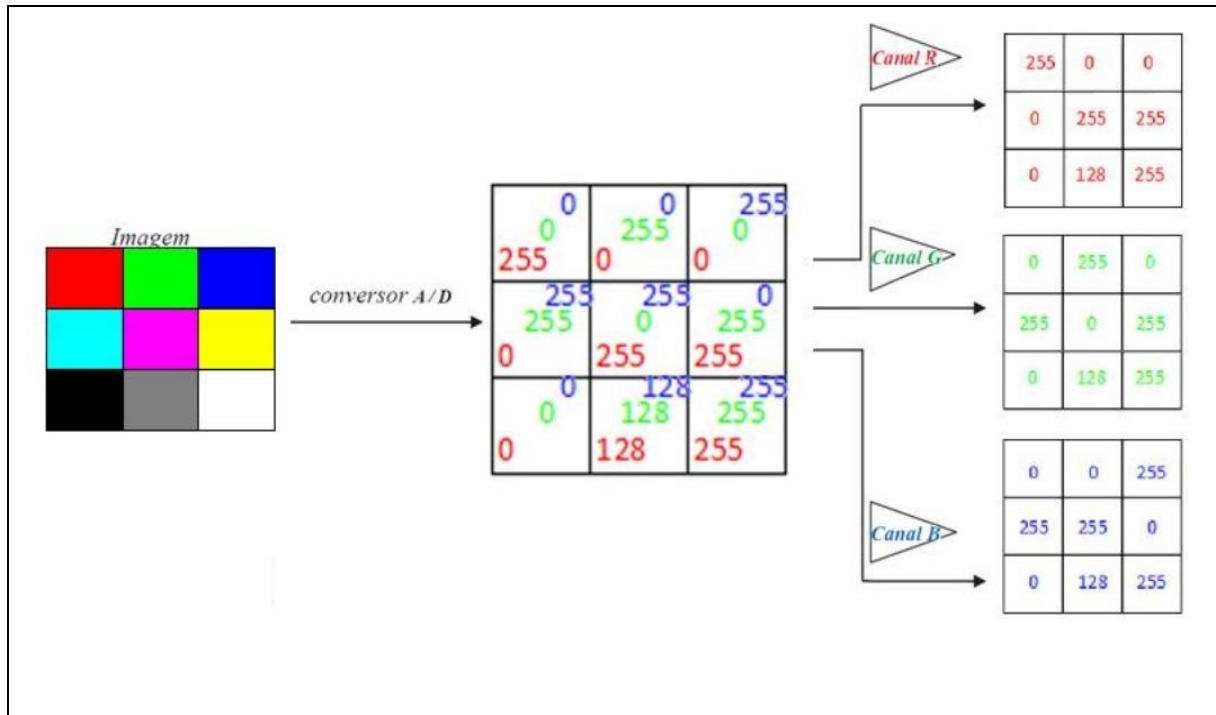


Fonte: Adaptado Keese (2012).

Apesar de apresentar uma forma mais simples de armazenamento, o sistema RGB tem sua eficácia comprovada através de trabalhos nas mais diversas áreas de aplicação, tais como Nishidate (2019), que utiliza o RGB associado a uma câmera para realizar análises sem contato de pacientes durante estresse psicológico. Já Parra (2020), relata sua experiência exitosa na combinação de dados adquiridos por uma câmera RGB e um *scanner*, para criar nuvens de pontos que descrevem a aparência de um determinado ambiente. Por fim, e mais próximo à realidade do presente trabalho, Lin (2019) apresenta bons resultados com sua metodologia capaz de localizar e segmentar objetos em uma imagem.

A metodologia aqui proposta realiza, através do sistema RGB, a identificação da intensidade de cada cor e o armazenamento digital de cada *frame* de vídeo, na forma de matriz de *pixels*. No sistema RGB, o armazenamento é realizado na forma de 3 matrizes (uma para cada canal de cor), que têm o tamanho determinado pela resolução, como ilustrado pela Figura 3.7. É importante lembrar também que, nesse tipo de sistema, cada uma das camadas de cores deve representar um canal de cor, contendo a sua intensidade em cada célula, de maneira numérica.

Figura 3.7 - Conversão de uma imagem analógica para digital e decomposição em cada camada de cor em cada matriz.



Fonte: TAKAHAMA (2019).

3.2 CALIBRAÇÃO

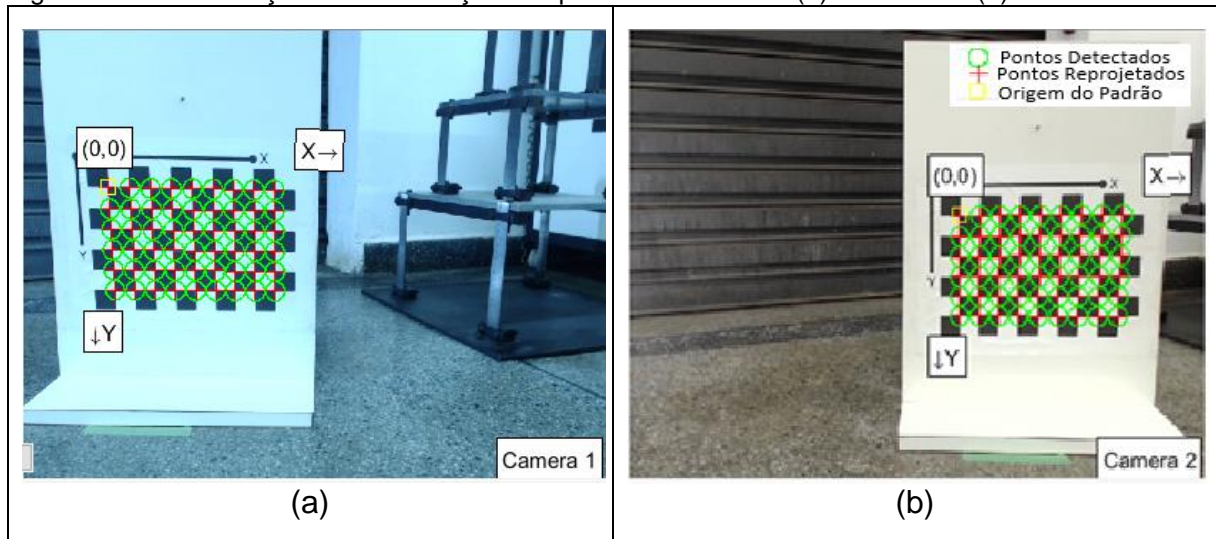
A metodologia empregada neste trabalho propõe a aquisição de imagens através de duas *webcams* sincronizadas, o que possibilita a identificação do deslocamento no espaço tridimensional de um objeto. A calibração do par de câmeras é extremamente importante, pois através dela é possível realizar a caracterização das mesmas.

3.2.1 Padrão Geométrico

A identificação dos parâmetros é realizada 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 Bouquet (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 3.8, sendo a Figura 3.8 (a) a visão da câmera 1 à esquerda e Figura 3.8 (b) e visão da câmera 2 à direita.

Figura 3.8 – Identificação das intersecções do padrão de tabuleiro (a) câmera 1 e (b) câmera 2.



Fonte: Autoria própria.

As imagens são adquiridas em vários *frames*, com diferentes posições espaciais do padrão de tabuleiro. De acordo com Takahama (2019), o algoritmo localiza a posição do alvo na forma de um ponto p no par de imagens (identificado nas imagens 9 (a) e (b) como, *checker board origin*), tornando possível estimar numericamente as etapas para realização do processo de calibração, uma vez que todos os pontos localizados são detectados (entradas conhecidas) e é determinado a posição dos pontos no espaço X, Y, Z por estarem equidistantes em relação a uma origem (saídas conhecidas).

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

3.3 AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Consideradas as características relacionadas aos aspectos construtivos das câmeras anteriormente mencionadas, é possível elaborar metodologias e procedimentos para a captura de imagens. Na subseção 3.3.1, serão apresentados alguns conceitos necessários à realização do processamento de imagens de maneira fidedigna.

3.3.1 Marcação Temporal

A eficácia da análise dinâmica de objetos ou estruturas através do processamento de imagens está intimamente ligada à capacidade de percepção do movimento dos mesmos. Nesse contexto, surge o conceito fundamental de taxa de amostragem, que pode ser definido como a velocidade de captura dos *frames* de uma cena, ou ainda a taxa de aquisição dos *frames*, medida em *frames* por segundo (fps).

Em seu trabalho, Scuri (2002) compara os princípios de amostragem do olho humano com os de uma câmera digital, em que o sistema de visão do ser humano envia constantemente, para o cérebro, a informação visual captada pelo olho, induzindo-o a enxergar, de forma contínua e no decorrer do tempo, imagens bidimensionais projetadas na retina. Através dessa comparação, ele salienta que a taxa de amostragem pode ser finita, podendo ocasionar o fenômeno conhecido como *Aliasing*. O *Aliasing* ocorre quando se utiliza uma amostragem inadequada do sinal analógico e, ao reconstruí-lo digitalmente, obtém-se resultados inconsistentes com o real e esperado.

O fenômeno em questão pode ser observado em diversas situações, a exemplo de quando nota-se que o movimento de rotação da roda de um automóvel parece estar no sentido oposto ao movimento do veículo. Este efeito visual ocorre justamente porque a taxa de amostragem temporal está muito baixa. Deste modo, a roda está girando em uma frequência maior do que a câmera é capaz de capturar (RISSÁ, 2017).

Para Oppenheim e Shafer (1989), é possível evitar esse fenômeno através do Teorema de Nyquist, o qual define que para a correta aquisição de um sinal variável continuamente no tempo ocorra, é necessário que a taxa de amostragem deste sinal

seja, no mínimo, duas vezes o valor da frequência máxima desempenhada pelo objeto em estudo.

Neste trabalho foram utilizadas *webcams* que, diferente das câmeras compactas portáteis, não possuem *clock* de processamento interno. Esse detalhe faz com que a aquisição das imagens não apresente necessariamente uma taxa de aquisição constante, tendo em vista que o processo depende do computador responsável pela identificação e armazenamento dos *frames* obtidos pelas *webcams* (*clock* externo). Por isso é necessário realizar a marcação temporal em cada *frame* da imagem capturada.

A não uniformidade de taxa de aquisição de imagens torna necessário realizar um processo de reconstrução de sinal através do processo de interpolação, permitindo a realização do tratamento adequado dos dados amostrais para obtenção do espectro de frequência. A reconstrução do sinal de deslocamento dinâmico é reamostrada através do comando “*resample*”, do *software* MATLAB®, com método para interpolação do tipo “*Spline*”. Trata-se da interpolação cúbica descrita no trabalho de De Boor (1978), onde essa aproximação é descrita como um método de interpolação eficiente para deslocamentos senoidais impostos, contudo, mais estudos sobre o método devem ser realizados para verificar a eficiência do tratamento de sinal experimentalmente (TAKAHAMA, 2019).

No *Visual Object Detector by Computational Analysis*, a marcação é realizada através de sub-rotina implementada no *software* MATLAB®, que realiza o controle dos parâmetros de aquisição de imagens através da *webcam*, via computador. Além do mais, a sub-rotina determina a quantidade de *frames* adquiridos e a resolução da imagem, aloca o espaço necessário para armazenamento do vídeo em memória RAM, adquire os *frames* e insere identificação temporal, salvando-os no HD do computador.

3.4 PÓS-PROCESSAMENTO DA IMAGEM

Na mesma cena onde foi realizada a calibração e, sem que haja alteração no posicionamento do par de *webcams*, deve ser feita a aquisição do vídeo que efetuará a captura dos movimentos do alvo de interesse. São as imagens do vídeo que fornecem a sequência do movimento do alvo quadro a quadro. A etapa de pós-processamento tem por objetivo a localização do alvo na imagem, sua separação dos

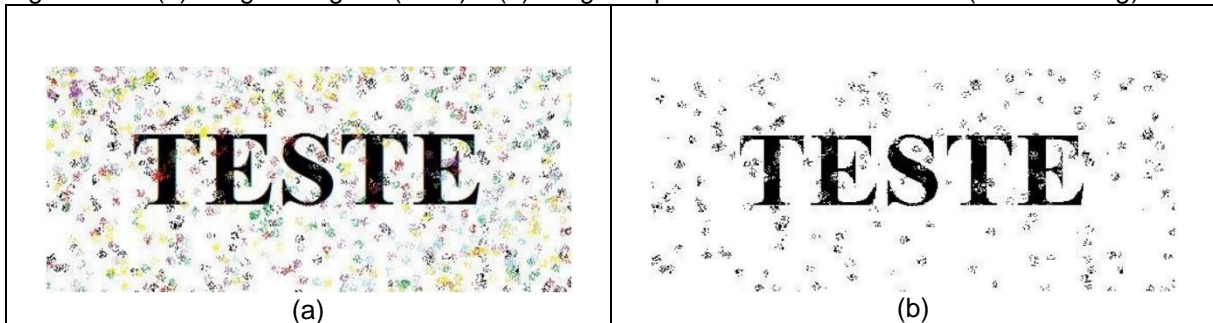
demais elementos presentes na cena, possibilitando a obtenção da posição do *pixel*, e sua posição na imagem.

3.4.1 Identificação do alvo

A metodologia discutida neste trabalho propõe a separação dos alvos do restante da cena. Tarefa realizada através de ferramentas computacionais para o processamento de imagens de segmentação e morfológica, empregadas em cada *frame* do vídeo adquirido.

Segundo Sabino (2013), a forma mais eficiente de realizar essa separação é removendo intensidades de cores que não são de interesse. Para tal finalidade, é possível utilizar a ferramenta denominada limiar de corte, comumente chamada de *thresholding* (GONZALEZ; WOODS 2002). Na Figura 3.9, Sabino (2013) apresenta, em um primeiro momento, uma imagem colorida e, na sequência, a mesma imagem com a aplicação do limiar de corte em um dado valor.

Figura 3.9 – (a) Imagem original (RGB) e (b) imagem após uso do limiar de corte (*Thresholding*)

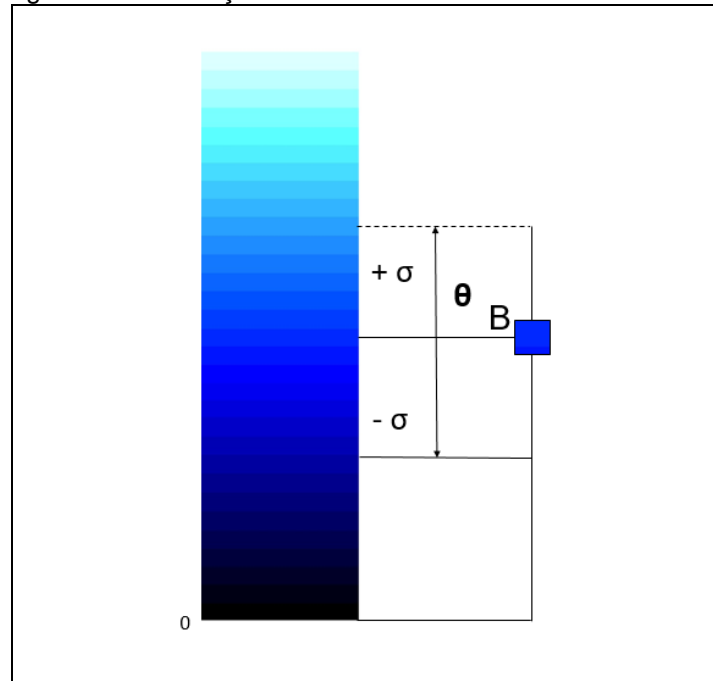


Fonte: SABINO (2013).

Salienta-se que o limiar de corte para separação do alvo do restante da cena é reafirmado por Pinoli (2014).

A escolha da faixa de intensidade da cor de interesse foi baseada no sistema de cores RGB, conforme proposto por Takahama (2019), em que o desvio padrão σ é definido como tolerância das intensidades de cores, e a média da cor $X=0$ representa a cor do alvo como valor de referência. A Figura 3.10 aponta a seleção de uma intensidade de cor no canal B.

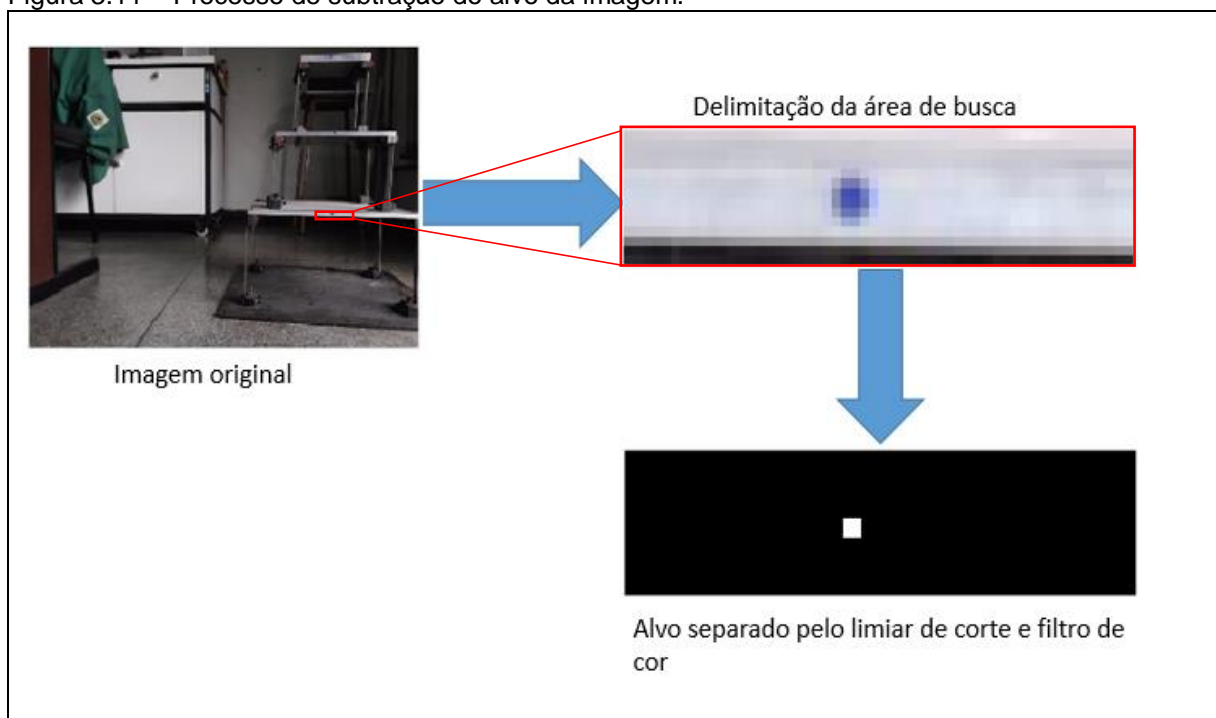
Figura 3.10 – Seleção de uma intensidade de cor no canal B.



Fonte: Adaptado de Takahama (2019).

Essa etapa do pós-processamento é de suma importância, tendo em vista que é neste momento, com o limiar de corte e posteriormente com o filtro de cores, que o alvo será subtraído do restante da imagem. A Figura 3.11 ilustra os passos da separação do alvo do resto da imagem.

Figura 3.11 – Processo de subtração do alvo da imagem.

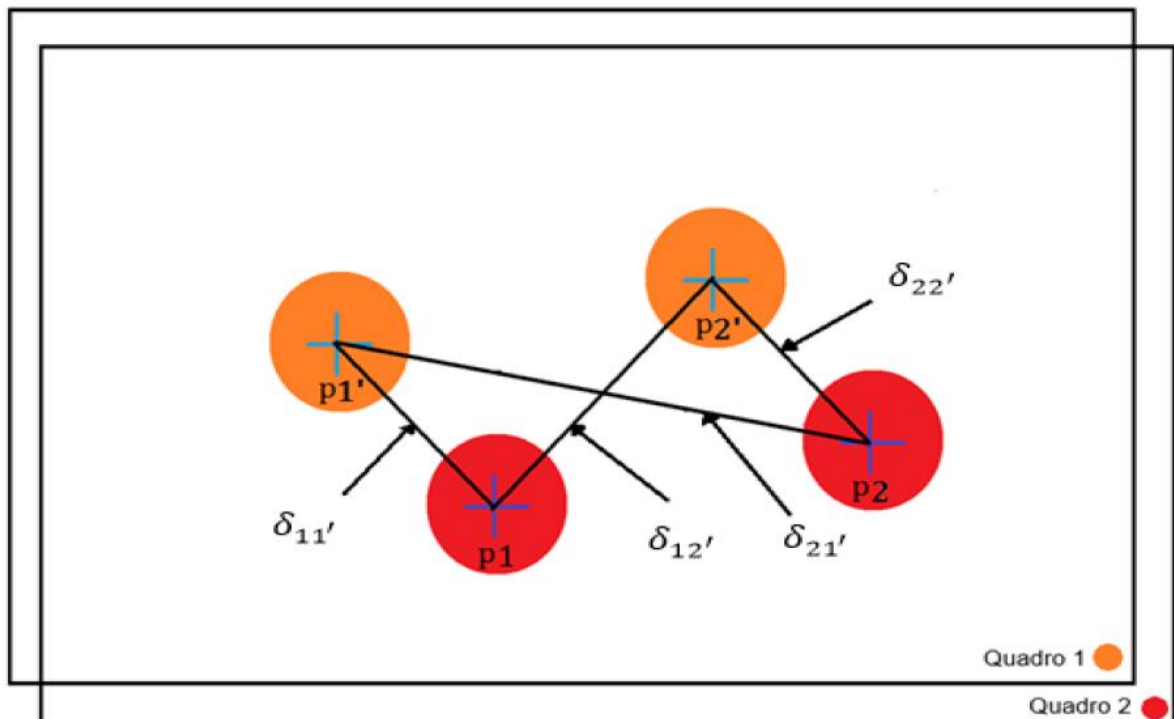


Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Identificação do centroide do alvo

Com o alvo separado do restante da cena, é necessário realizar a análise de seu deslocamento ao longo do tempo. Para cada instante de tempo, teremos dois *frames* adquiridos pela câmera esquerda e direita, de forma sincronizada. A metodologia empregada no *Visual Object Detector by Computational Analysis* prevê a indexação dos alvos, possibilitando a organização das informações de posição de um ou mais alvos ao mesmo tempo. Na sequência, o centroide do alvo é calculado com base na análise da sequência de *frames* de uma mesma cena, assumindo que cada alvo tem um determinado índice inicial. O cálculo é feito através da relação da menor posição do alvo em relação aos outros alvos do *frame* anterior. A Figura 3.12 ilustra a técnica mencionada.

Figura 3.12 – Determinação da organização dos alvos



Fonte: TAKAHAMA (2019).

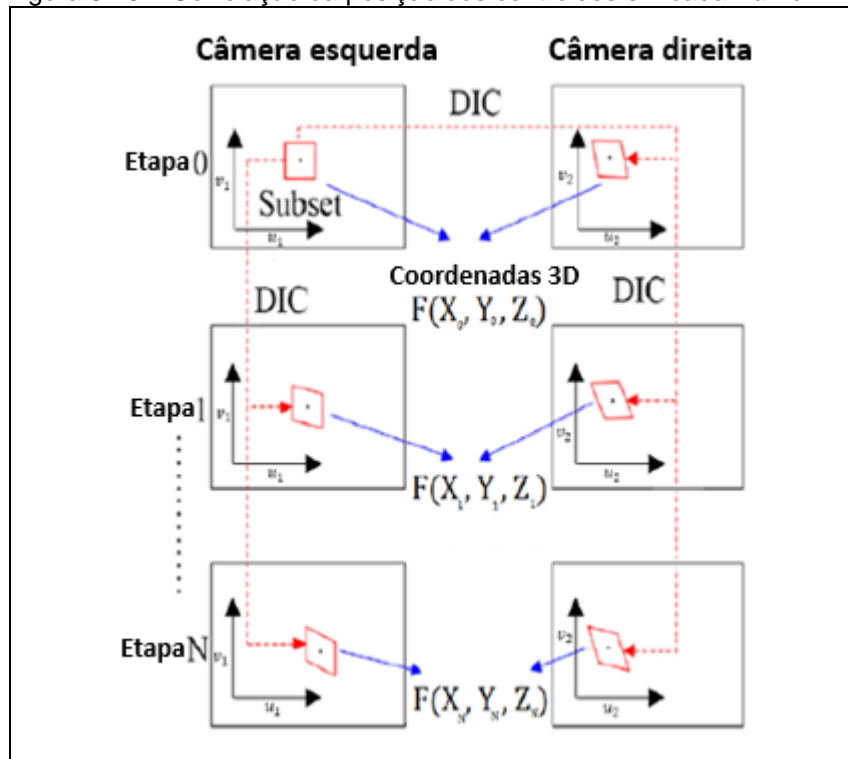
O alvo $p1$ do Quadro 2 calcula as distâncias $\delta_{11'}$, e $\delta_{12'}$, em relação ao centroide do alvo $p1'$ e $p2'$ do *Frame* 1 anterior. De forma análoga, o alvo $p2$ calcula as distâncias $\delta_{21'}$, e $\delta_{22'}$, em relação ao centroide do alvo $p1'$ e $p2'$ do *Frame* 1 anterior. Caso possu

a menor distância calculada, o alvo permanecerá com o mesmo endereço TAKAHAMA (2019).

3.4.3 Análise e obtenção de frequência

A obtenção da frequência proposta pelo *Visual Object Detector by Computational Analysis* baseia-se na Correlação de Imagem digital 3D (*Digital Image Correlation – 3D DIC*), que possibilita a obtenção 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), conforme ilustrado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Correlação da posição dos centroides em cada *frame*

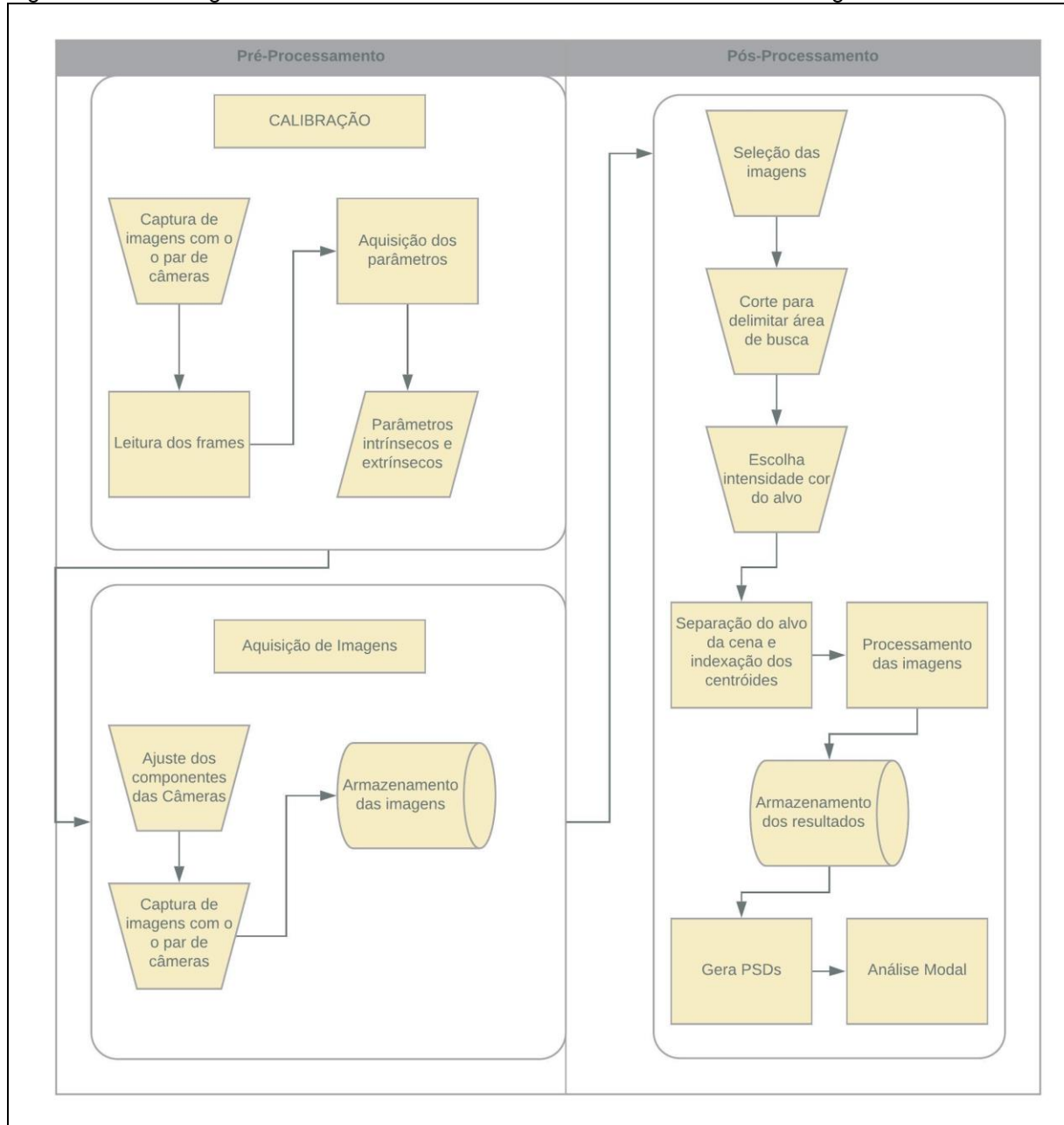


Fonte: Adaptado de Takahama (2019).

A Correlação de Imagem Digital tem sido aplicada em vários trabalhos relacionados à análise de vibração, tais como Wang (2019), Bharadwaj (2019), Srivastava (2019) e Hunady (2019), que apesar de tratarem de objetos de estudo diferentes, utilizam duas câmeras para realizar a correlação de imagem digital.

O fluxograma da Figura 3.14 exemplifica todos os procedimentos do pré-processamento e pós-processamento de imagens que devem ser realizados após a montagem do aparato experimental.

Figura 3.14 – Fluxograma de Pré-Processamento e Pós-Processamento de imagens.



Fonte: Autoria própria.

A última etapa de pós-processamento, PSDs e análise modal, será abordada na seção 3.5.

3.5 ANÁLISE MODAL

A Análise Modal é utilizada para o estudo do comportamento dinâmico de sistemas estruturais, por meio de modelos matemáticos, envolvendo formulações matriciais que permitem estabelecer uma relação entre a entrada (excitação) e saída (resposta à excitação) de estruturas, através da Função de Resposta em Frequência (FRF). Entretanto, em condições reais de operação, na maioria das vezes não é possível medir o valor de entrada, ou seja, apenas os dados de resposta da estrutura são mensuráveis e o processo de identificação do sistema necessitará basear-se apenas no valor das respostas medidas no próprio sistema; esta identificação obtida sem utilizar as informações de excitação é conhecida como análise modal baseada apenas na resposta, ou ainda análise modal operacional (LARDIES E MINH-NGI, 2011).

Para que seja possível realizar a análise do comportamento dinâmico de uma estrutura, deve-se observar três hipóteses: a linearidade do comportamento dinâmico; a invariabilidade dos parâmetros físicos da estrutura analisada ao longo do tempo; e por fim, a visibilidade do comportamento dinâmico.

Em seus trabalhos Cunha e Caetano (2004), Borges (2006), Freitas (2008), Leonardi (2015), Berton Junior (2016), Feng (2016), Hu (2019) e Uehara (2019) aplicam técnicas de análise modal que utilizam apenas a resposta do sistema. Nestes trabalhos foram utilizados sensores com contato (acelerômetros) e sensores sem contato (câmeras, laser) a depender da especificidade do sistema analisado.

Segundo Borges (2006), os métodos de identificação dos parâmetros modais, utilizando apenas a resposta no domínio da frequência podem ser agrupados basicamente em duas classes: o método básico no domínio da frequência (BFD) ou *Peak Picking* – seleção de pico (PP) e o método de Decomposição no Domínio da Frequência (FDD).

Nos dois métodos mencionados, a identificação dos parâmetros modais é feita através de funções de densidade espectral da resposta do sistema, que por sua vez, podem ser divididas em funções de densidade espectral de potência e funções de densidade espectral cruzada. Na construção da matriz de densidade espectral, as funções de densidade espectral de potência ficam posicionadas na diagonal principal,

enquanto nas demais posições se encontram as funções de densidade espectral cruzada.

Conhecida a matriz de densidade espectral os métodos divergem sutilmente quanto aos procedimentos para identificação dos parâmetros modais.

No método *Peak Picking*, Felber (1993), afirma que, através da normalização e tomada de média das funções de densidade espectral, é possível obter a média normalizada da densidade espectral de potência, que mostra todos os picos de ressonância correspondente aos modos de vibrar do sistema. A identificação das frequências desses picos fornece uma primeira ideia das frequências dos modos de vibrar do sistema.

Já no método de decomposição no domínio da frequência (FDD), Brincker *et al.* (2000) apontam que, para cada frequência discreta, a matriz de densidade espectral é decomposta em valores e vetores singulares, utilizando a decomposição em valores singulares (SVD). Através dessa decomposição é possível identificar os diferentes modos de vibrar da estrutura, levando em consideração que cada pico de frequência contribui para a resposta final do sistema analisado. Segundo Berton Junior (2016), o primeiro vetor singular para o pico de frequência do k-ésimo modo é a própria estimativa deste modo e, a partir, da análise dos valores singulares é possível identificar a função de densidade espectral relacionada, com um dado grau de liberdade correspondente ao k-ésimo modo de vibrar do sistema.

Quanto aos resultados alcançados, a técnica no domínio da frequência, tal como a *Peak Picking*, que são baseadas no simples processamento do sinal através da Transformada Discreta de Fourier, fornecem uma estimativa razoável da frequência natural e dos modos de vibrar, apenas se os modos forem bem separados. Para modos próximos, elas podem apresentar alguma dificuldade na identificação mesmo que os modos possam ser identificados, a estimativa fica contaminada. Outro aspecto é a limitação na estimativa da frequência devido aos problemas relacionados à resolução do espectro de potência, assim como a incerteza na estimativa do amortecimento (BERTON JUNIOR, 2016).

Para Brincker *et al.* (2000), a utilização do método de decomposição no domínio da frequência (FDD) reduz essa limitação de identificação dos modos de vibrar. Maiores informações sobre o método de Decomposição no Domínio da Frequência (FDD) podem ser detalhadamente encontradas em Borges (2006).

3.5.1 Coeficiente MAC

O coeficiente MAC (Coeficiente de Correlação Modal, do inglês *Modal Assurance Criterion*) trata a correlação entre dois autovetores quaisquer, responsável por fornecer uma medida de consistência, isto é grau de linearidade entre estimativa de vetores modais (ALLEMANG, 2003).

Ainda segundo Allemang (2003), o MAC é um método que possibilita a comparação de duas estimativas de vetores modais, provenientes de fontes diferentes. Exemplificando, os vetores modais de uma análise realizada por elementos finitos podem ser comparados com aqueles determinados experimentalmente, nesse contexto é possível afirmar que o coeficiente possibilita a comparação de vetores modais determinados com métodos distintos.

O coeficiente MAC é calculado pela Eq.1:

$$MAC_{(i,j)} = \frac{|\{\Phi_i^a\}^T \{\Phi_j^e\}|^2}{(\{\Phi_i^a\}^T \{\Phi_i^a\})(\{\Phi_j^e\}^T \{\Phi_j^e\})} \quad (1)$$

$\{\Phi_i^a\}$ - vetor modal simulado referente ao modo i;

$\{\Phi_j^e\}$ - vetor modal simulado referente ao modo j.

Segundo Juliani (2014), o coeficiente MAC é uma quantidade escalar, independente se os autovetores forem complexos ou não, então, o MAC irá correlacionar os pares de vetores modais assumindo valores entre 0 e 1. Segundo Allemang (2003) e Kloutsey, Diniz e Villa (2006), um valor do MAC entre 0,9 e 1,0 irá indicar uma boa proximidade dos modos e, caso o valor encontrado seja 1,0, é um indicativo de que os vetores modais são idênticos, havendo uma perfeita correlação entre eles. Por outro lado, se o valor for perto de zero, conclui-se que os modos de vibrar são diferentes, isto é, sem nenhuma correlação.

Além disso, para Allemang (2003) e Kloutsey, Diniz e Villa (2006) a eficácia deste método de comparação irá depender da quantidade e também da qualidade dos resultados obtidos experimentalmente. Por exemplo, a determinação das deformadas

modais necessitará de números de pontos de medidas tão maiores quanto à complexidade da estrutura e também ao número de modos a serem medidos.

Em seus trabalhos Ay et al. (2019), Nguyen et al. (2019) e Eslaminejad et al. (2019) utilizam as técnicas de correlação de coeficiente MAC para verificar a correlação existente entre duas técnicas distintas de análise modal.

O coeficiente MAC pode ser representado de diferentes maneiras. Allemang (2003) utiliza uma tabela, onde cada modo da situação referência é comparado com todos os modos das outras situações. Já Borges (2006) e Berton Junior (2016) utilizam um gráfico de barras, em que o valor da situação referência é comparado com todas as outras e, desta maneira, os vetores modais de mesmo modo devem ter valores próximos de 1 para que forneçam uma boa correlação, enquanto os valores próximos a 0, indicam que não há boa correlação entre modos.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo, com o intuito de avaliar a técnica proposta, serão apresentados os resultados dos experimentos executados. Para tanto, foram realizados dois experimentos utilizando metodologias distintas aplicadas a uma mesma estrutura experimental.

4.1 EXPERIMENTO 1 – AQUISIÇÃO DE DADOS DE FREQUÊNCIA DE UMA ESTRUTURA UTILIZANDO ACELERÔMETROS

O primeiro experimento foi realizado por meio do método clássico de aquisição de dados, que utiliza acelerômetros e martelo instrumentado. A medição foi realizada em uma estrutura experimental composta por três patamares, constituídos de chapas quadradas de alumínio com as seguintes especificações: base constituída de chapa de aço estrutural, 1020, de 445 mm² e 6 mm de espessura e massa total de 9,500kg; patamar inferior constituído de chapa quadrada de alumínio, medindo 347 mm², 10 mm de espessura e massa total de 3,200 kg; patamar mediano constituído de chapa de alumínio quadrada, medindo 247 mm², 10 mm de espessura e massa total de 1,600 kg; e patamar superior constituído de chapa de alumínio quadrada, medindo 150 mm², 13 mm de espessura e massa de 0,750 kg. Os patamares são interligados entre si e a base por 4 lâminas de 100 mm de altura, 30 mm de largura e 2 mm de espessura, conforme mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Estrutura experimental (Solidworks®).



Fonte: A autoria própria.

Os sinais de aceleração foram medidos com acelerômetro da fabricante PCB Piezotronics®, fixado na lateral de cada patamar da estrutura experimental. A força impulsiva usada para excitar a estrutura foi gerada através de um martelo de impacto da mesma fabricante.

Para a aquisição dos sinais, foram utilizados a placa de aquisição de dados, Quattro e o *software* de pós-processamento SignalCalc Ace®, ambos da fabricante Data Physics®. É importante salientar que a placa de aquisição é capaz de adquirir tanto os sinais de saída (martelo), quanto os de entrada (acelerômetro). Já o *software* SignalCalc Ace® permite que seja determinada a sensibilidade tanto do acelerômetro quanto do martelo e processamento de dados para que se obtenhas as FRF(s).

No Quadro 01 estão elencados todos os equipamentos utilizados para realização do experimento com a metodologia clássica.

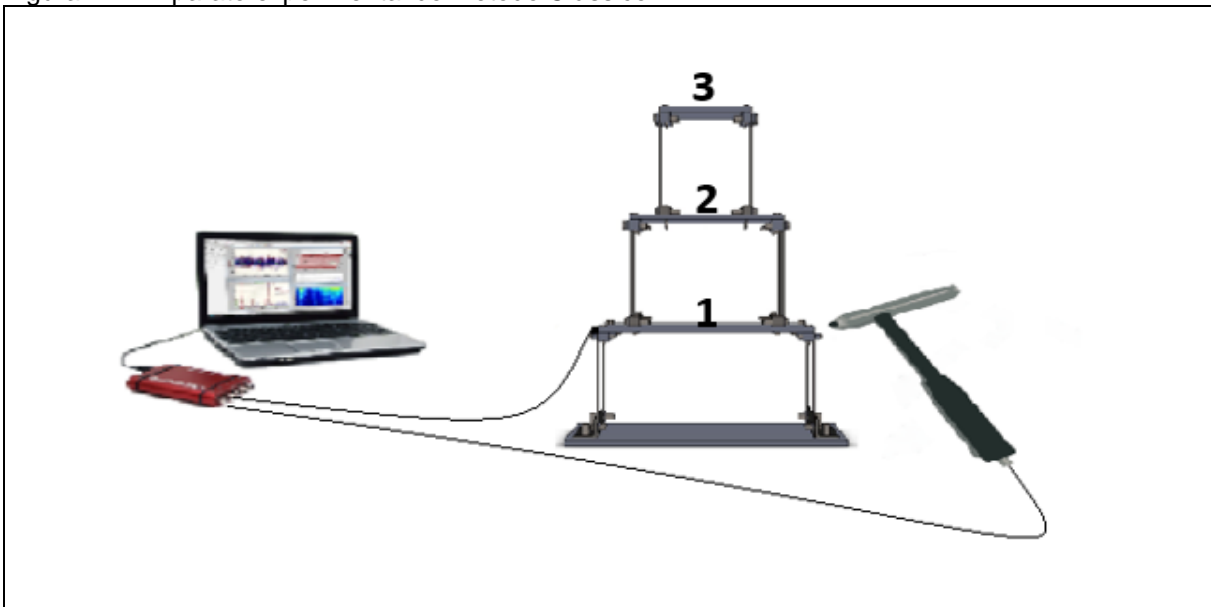
Quadro 01 – Especificações de *hardware* do sistema clássico.

Item	Componente	Especificação
Computador	Memória	12.00 GB de memória (RAM)
	Processador	Intel(r) i7-2600 CPU @3.40GHz
Leitor/Gerador de Sinal	Marca/Modelo	Quattro – Data Physics®
	Entradas/Saídas	4 entradas/ 2 saídas
Leitor/Gerador de Sinal	Tensão máxima de entrada	0,1; 1,0; 10,0 Volts (configurável)
	Taxa de Aquisição Máxima	204,8 kHz
	Tensão máxima de saída	10 Volts
Martelo	Marca	PCB Piezotronics®
	Modelo	086C01
	Sensibilidade ($\pm 15\%$)	11,2 mV/N
Acelerômetro	Marca/Modelo	PCB Piezetronics® - 352C22
	Direções de leitura	Uniaxial
	Sensibilidade	10,73 mV/g
	Faixa de leitura	2 Hz a 10 kHz (2,5% de incerteza)

Fonte: Autoria própria.

O experimento deu-se pela excitação da estrutura, com o auxílio do martelo de impacto. Para a realização, foi determinada uma frequência de amostragem de 50 Hz, definida com 400 linhas espectrais no *software* SignalCalc Ace®. A excitação foi direcionada para a parte central do primeiro patamar da estrutura, identificada como item 1, na Figura 4.2. A resposta foi capturada pelos acelerômetros, nos três patamares e enviada para o dispositivo *Quattro*, que, por sua vez, converteu os sinais e os enviou para o *software* executado pelo computador. A seguir, a Figura 4.2 ilustra esquematicamente o aparato experimental utilizado.

Figura 4.2 – Aparato experimental do Método Clássico.

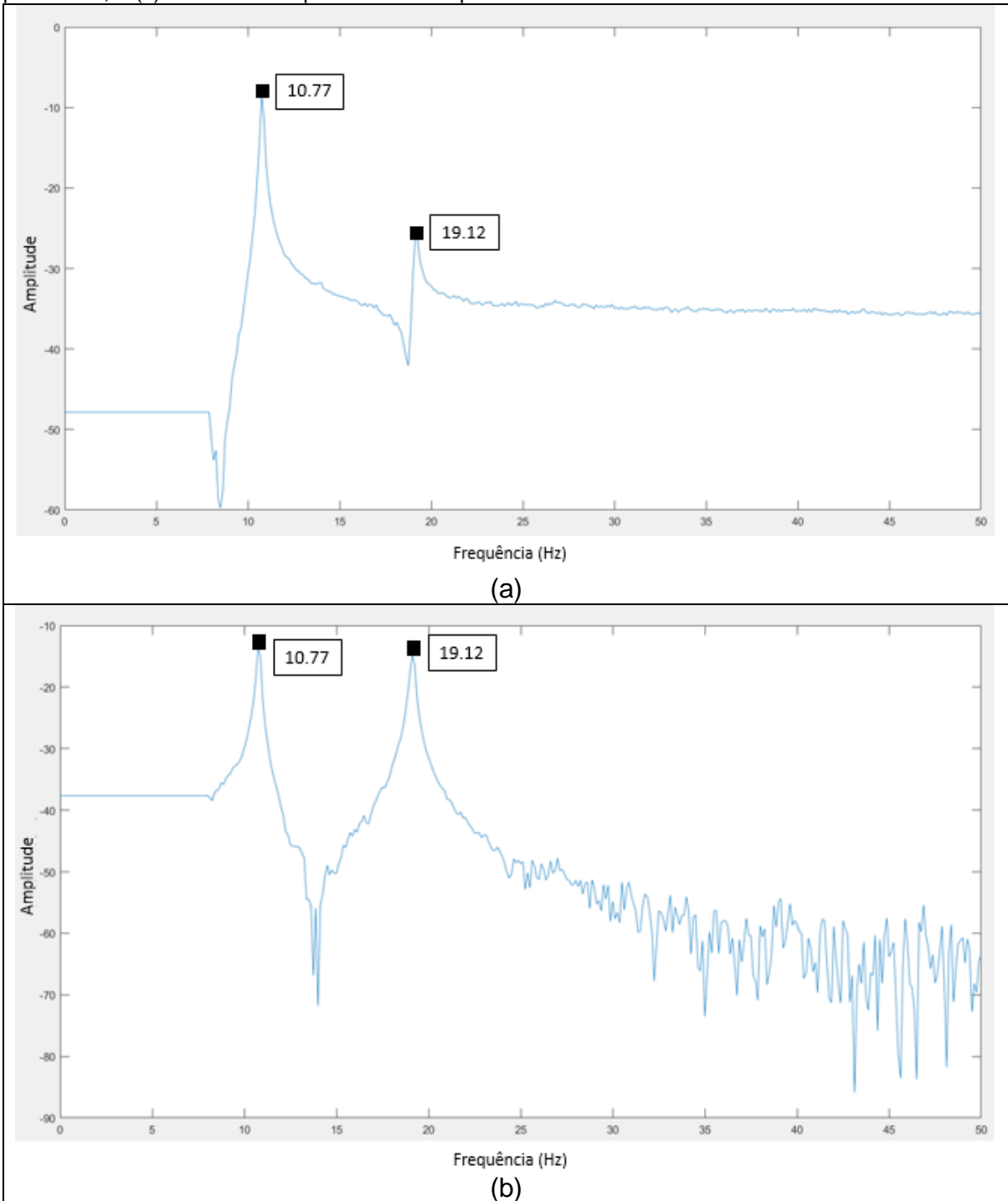


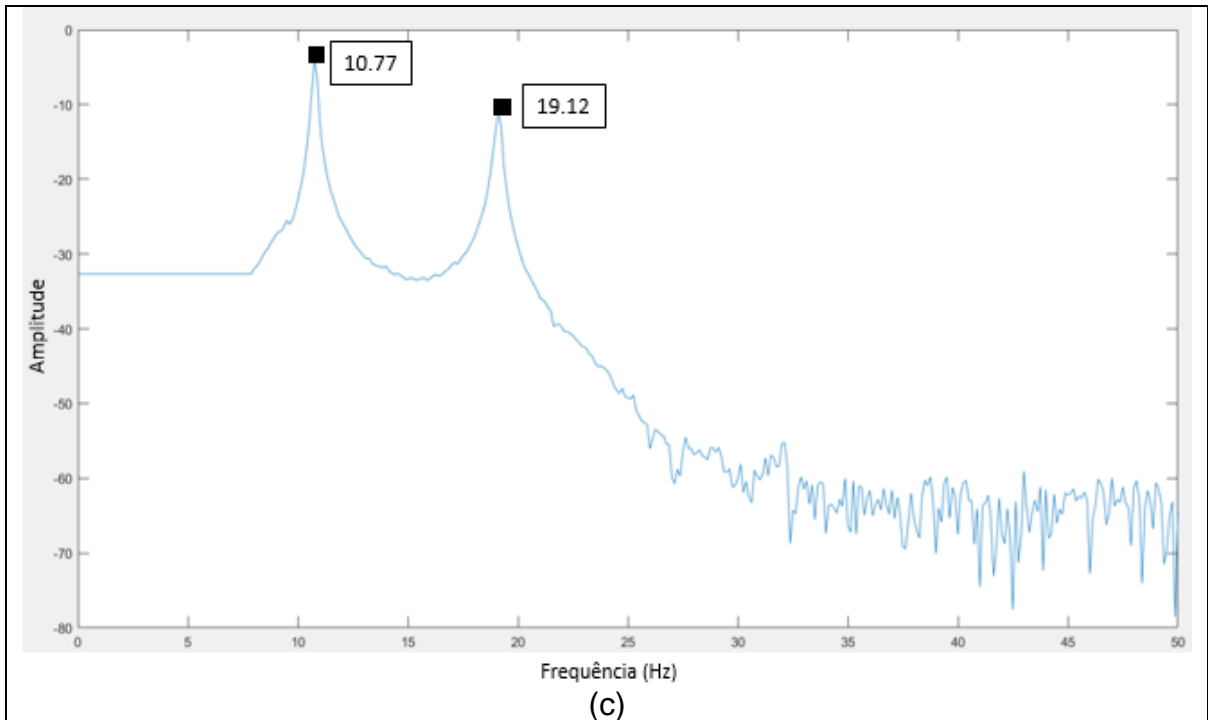
Fonte: Autoria própria.

- 1 – Patamar Inferior;
- 2 – Patamar Mediano;
- 3 – Patamar Superior.

Na Figura 4.3, pode-se observar os resultados obtidos através da análise da aquisição de dados.

Figura 4.3 – FRF(s) - (a) acelerômetro posicionado no patamar 1; (b) acelerômetro posicionado no patamar 2; e (c) acelerômetro posicionado no patamar 3.





Fonte: Autoria própria.

As FRF(s) fornecidas pelo *SignalCalc Ace*® foram processadas pelas rotinas de identificação do EMA (*Experimental Modal Analysis*), que se trata de um algoritmo de análise modal, implementado em ambiente Matlab®, capaz de identificar as frequências naturais, bem como, os modos próprios de vibrar. É importante salientar que o EMA é capaz de identificar parâmetros modais tanto em métodos clássicos, que medem as forças de entrada e resposta da estrutura, quanto em métodos que medem apenas a resposta da estrutura. O EMA foi desenvolvido no âmbito da Universidade Júlio de Mesquita Filho (UNESP/Ilha Solteira) e maiores informações sobre o algoritmo podem ser encontradas no trabalho de Borges (2006).

Desta forma, os parâmetros modais da estrutura foram identificados a partir das FRF(s), utilizando o método Ibrahim (IBRAHIM 1973). Nesta seção, optou-se por suprimir os resultados para que sejam apresentados posteriormente, no confronto com os dados obtidos a partir da presente metodologia.

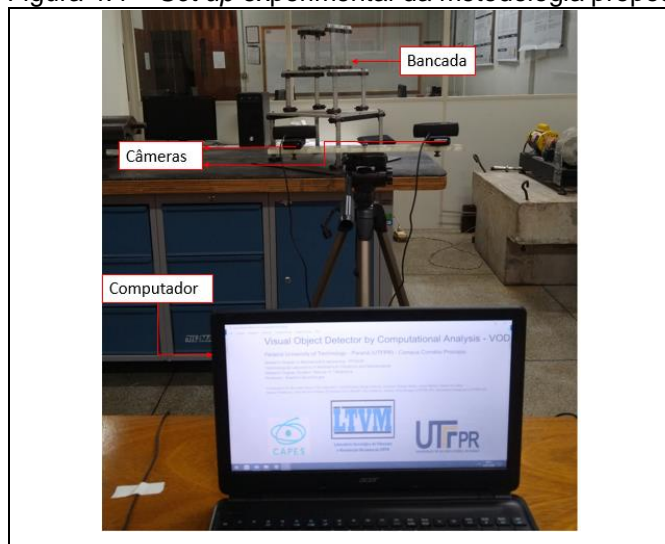
4.2 EXPERIMENTO 2 – AQUISIÇÃO DE DADOS DE FREQUÊNCIA DE UMA ESTRUTURA UTILIZANDO CÂMERAS

O segundo experimento tem o intuito de estimar as frequências naturais e os modos de vibrar da estrutura. Para isso foram utilizadas duas câmeras, com a finalidade de obter a sua resposta nas direções horizontal (eixo x), vertical (eixo y) e profundidade (eixo z). Com base nos dados adquiridos pela metodologia proposta, foi realizada a análise modal da estrutura. Para tanto, foram adquiridas imagens através do par de câmeras em 800 *frames* e tempo total de captura de 26,67 segundos, resultando em uma taxa média de 29,99 *frames* por segundo, em resolução de 640x480 *pixels*. No presente trabalho, foram utilizadas duas *webcams*, modelo C920, da marca Logitech, com sensores CMOS.

No EMA, estão implementados dois métodos: o de identificação no domínio do tempo, baseado no modelo de espaço de estado denominado Identificação Estocástica de Subespaço (SSI); e o método baseado no domínio da frequência, denominado Decomposição no Domínio da Frequência (DDF). Ambos baseados apenas na resposta, onde a entrada do sistema é desconhecida ou não medida.

No presente trabalho, foi utilizado o método de Decomposição no Domínio da Frequência (DDF), em que foram empregadas as densidades espectrais de potência, obtidas através do processamento das imagens pelo VODCA. O *set up* experimental da metodologia proposta pode ser observado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – *Set up* experimental da metodologia proposta.



Fonte: Autoria própria.

O Quadro 2 elenca todos os componentes de *hardware* utilizados para a realização do segundo experimento.

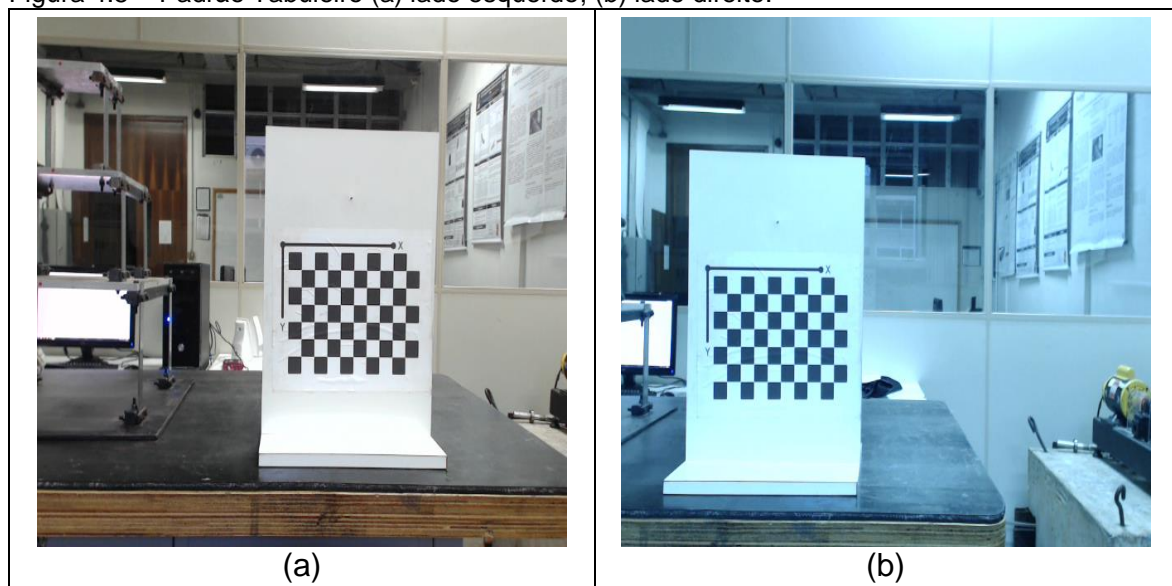
Quadro 2 – Especificações de *hardware* do sistema de aquisição de imagens experimental.

Itens	Componente	Especificação
Computador	Marca/Modelo	Acer modelo e1-572-6_br648
	Memória	4 GB/DDR3L SDRAM
	Processador	Intel Core i5 (4th Gen) 4200U
Webcam	Marca/Modelo	Logitech C920
	Sensor	CMOS
	Taxa de captura	Até 30 quadros por segundo (30 Fps)

Fonte: Autoria própria.

A calibração do sistema de aquisição foi feita pelo método de Zhang (2000), no qual os parâmetros de visão estéreo do par de câmeras são obtidos através do processamento de 60 *snapshots* sucessivos, com 54 pontos em cada padrão, em um total de 3.240 pontos. Conforme mencionado na seção 3.2, o padrão tabuleiro da Figura 4.5 é composto por quadrados, medindo 23,08mm.

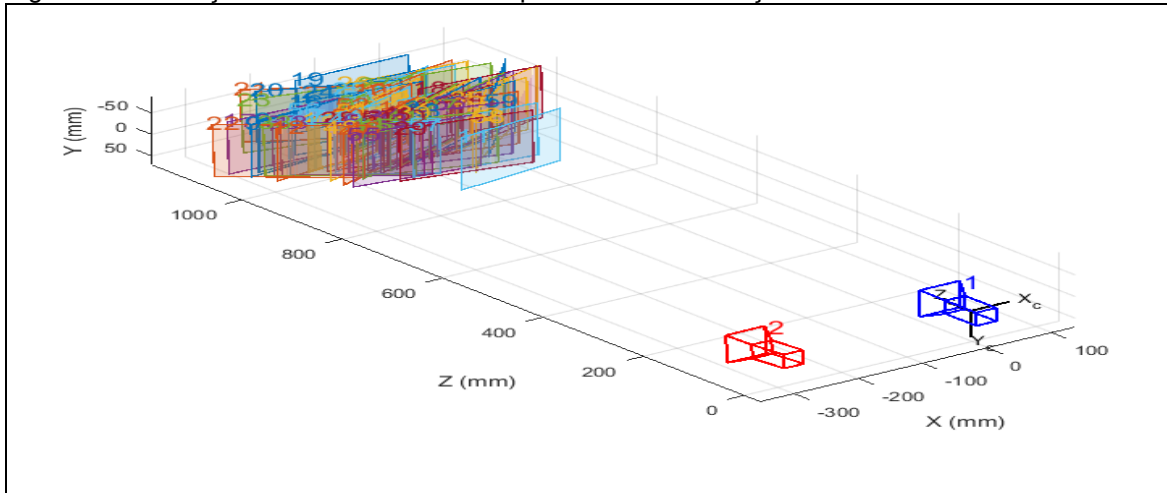
Figura 4.5 – Padrão Tabuleiro (a) lado esquerdo; (b) lado direito.



Fonte: Autoria própria.

Durante o processo de calibração, o padrão de tabuleiro foi posicionado em diferentes ângulos e posições espaciais, dentro do campo de visão do par de câmeras. As posições detectadas podem ser observadas na Figura 4.6.

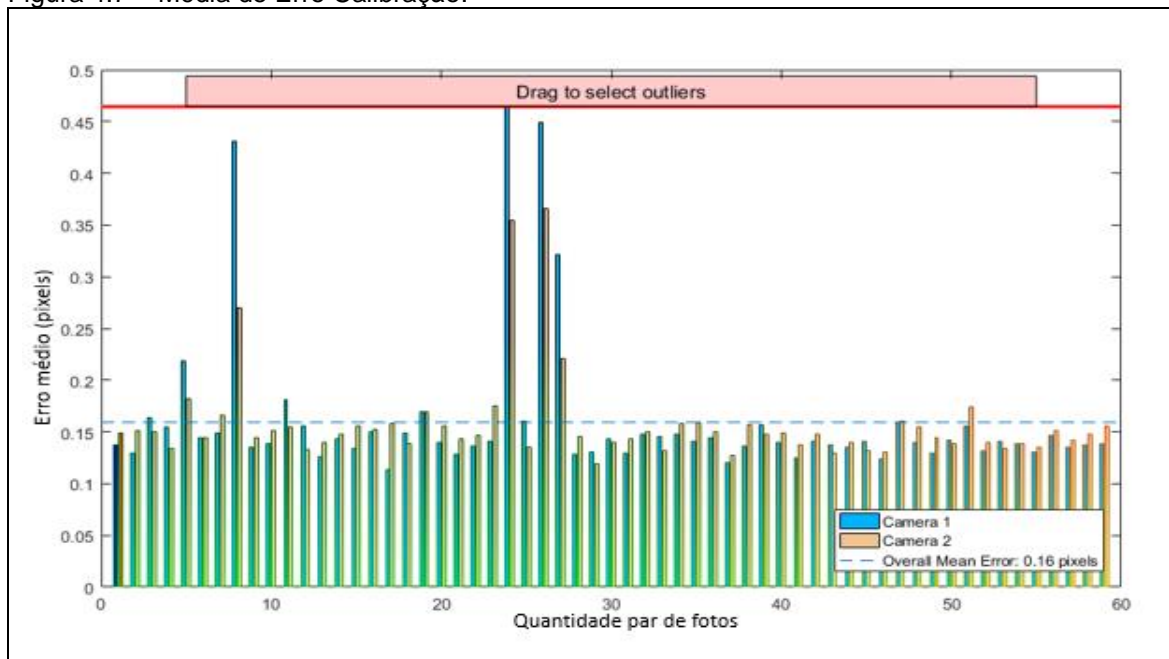
Figura 4.6 – Posições Padrão Tabuleiro no processo de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Realizada a calibração, encontrou-se o erro de reprojeção ε de 0,16 *pixels*, conforme pode ser observado na Figura 4.7, através da técnica de otimização de gradiente descendente, como critério de parada.

Figura 4.7 – Média de Erro Calibração.

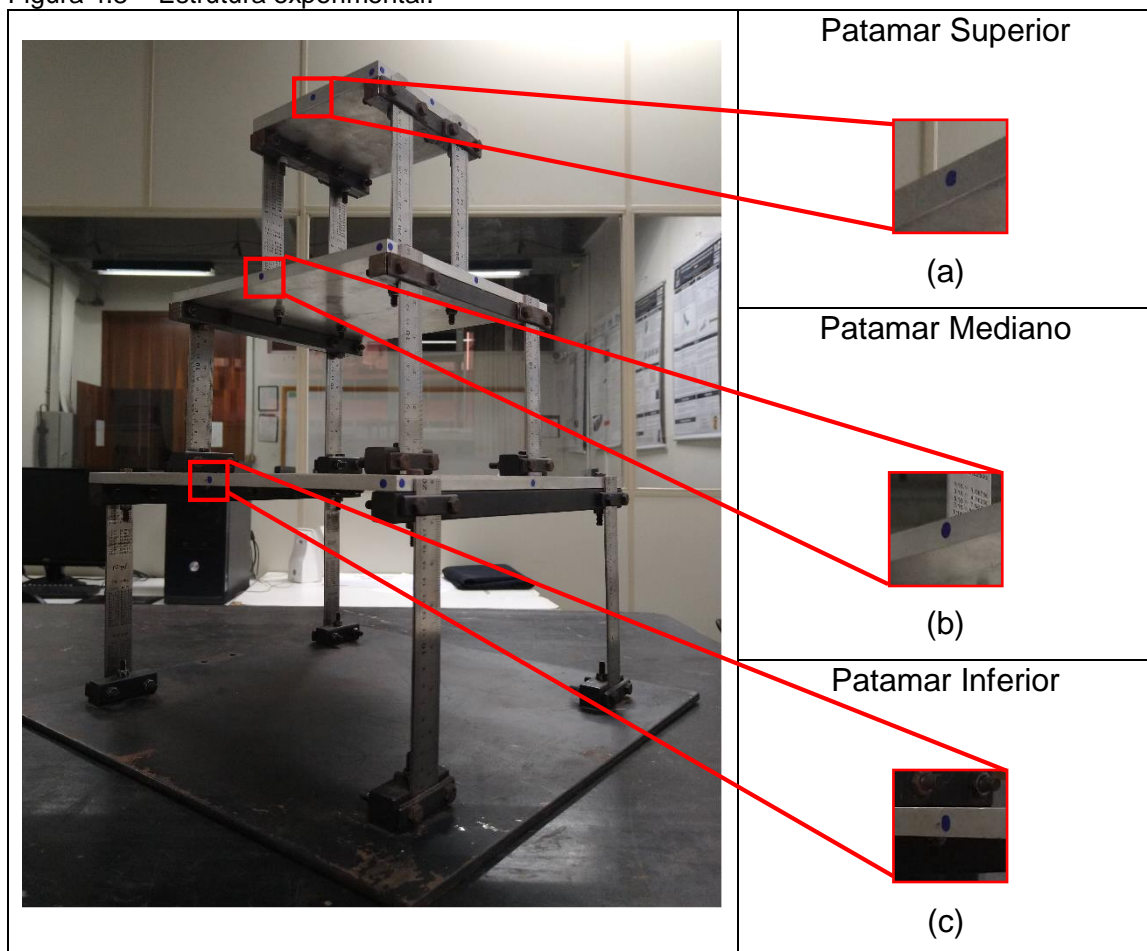


Fonte: Autoria própria.

Concluída a etapa de calibração, o experimento foi realizado por meio da fixação de um alvo azul nos 3 patamares da estrutura e posterior exposição à excitação impulsiva. Para a excitação, foi utilizado o mesmo martelo instrumentado utilizado no primeiro experimento, entretanto, no último experimento, os valores de entrada não foram medidos, com o propósito de realizar a análise modal apenas com as respostas do sistema. Nesse contexto, é importante ressaltar que, fora do ambiente experimental, são mais comuns situações onde não é possível mensurar a entrada de energia no sistema, conhecendo apenas as respostas.

Na Figura 4.8 é possível observar a estrutura e, em destaque, os alvos afixados.

Figura 4.8 – Estrutura experimental.



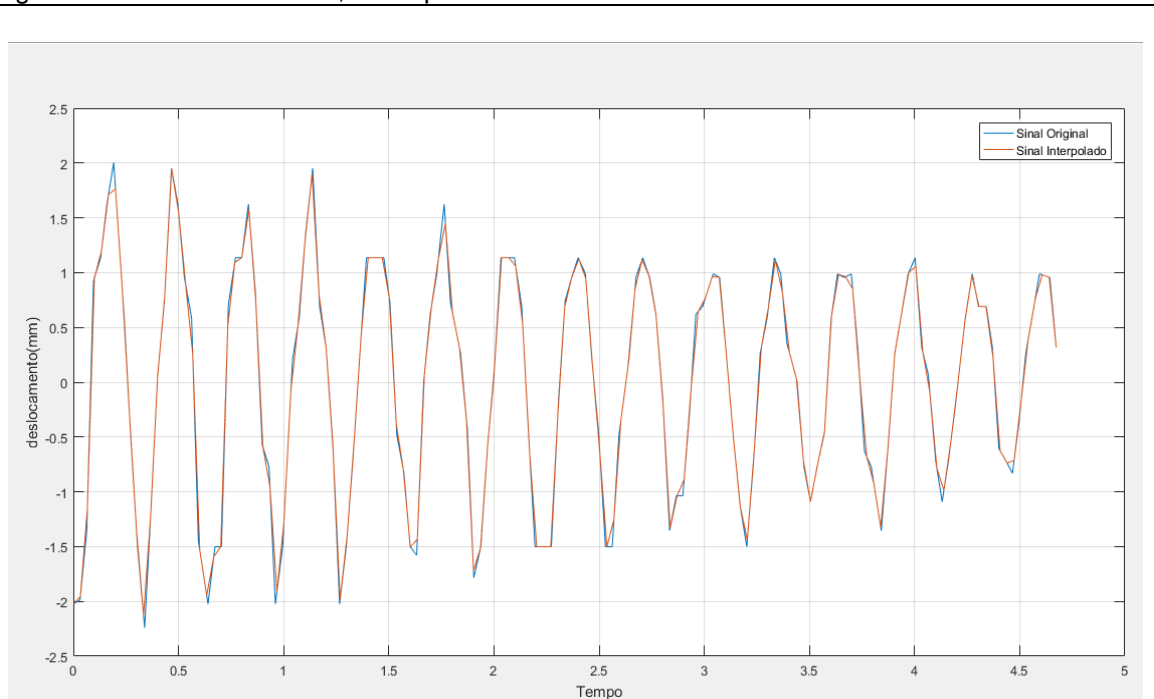
Fonte: Autoria própria.

Dos 800 *frames* capturados da cena, foram selecionados para esta análise 140 *frames*, que corresponde a cerca de 4,66 segundos da filmagem. Durante a realização do experimento, percebeu-se que a entrada impulsiva provocada através do martelo instrumentado ocasionou uma perturbação de pequena amplitude e que a bancada

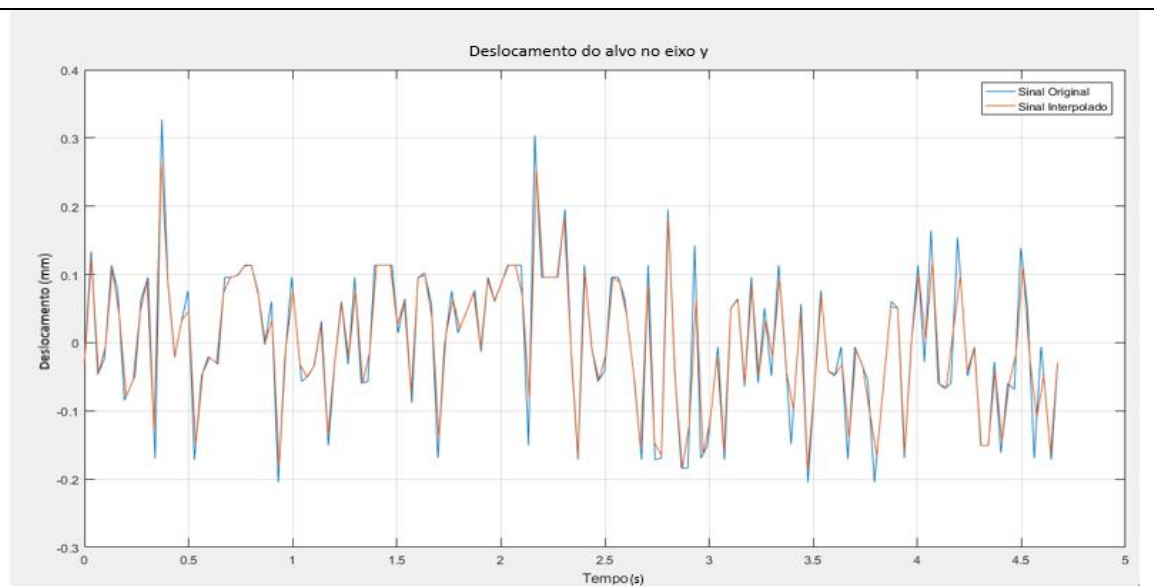
exerceu movimentos durante um curto período de tempo, tendendo rapidamente a zero, devido ao amortecimento.

Após o processamento das imagens pela metodologia proposta, foram obtidos os gráficos da Figura 4.9 (a), (b) e (c), nos quais é possível observar o movimento exercido pelo alvo, ao longo do tempo, e detectado pelo algoritmo nas posições espaciais X (a), Y (b) e Z (c), do patamar inferior da estrutura.

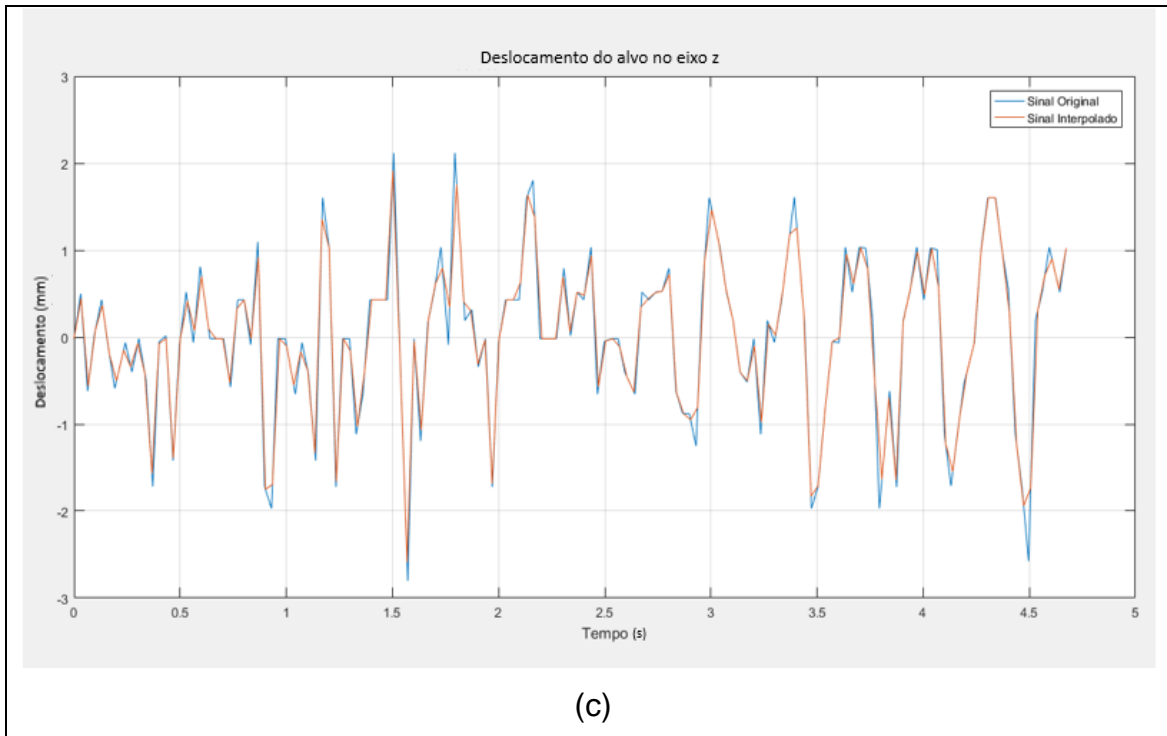
Figura 4.9 – Deslocamento X, Y e Z patamar inferior.



(a)



(b)

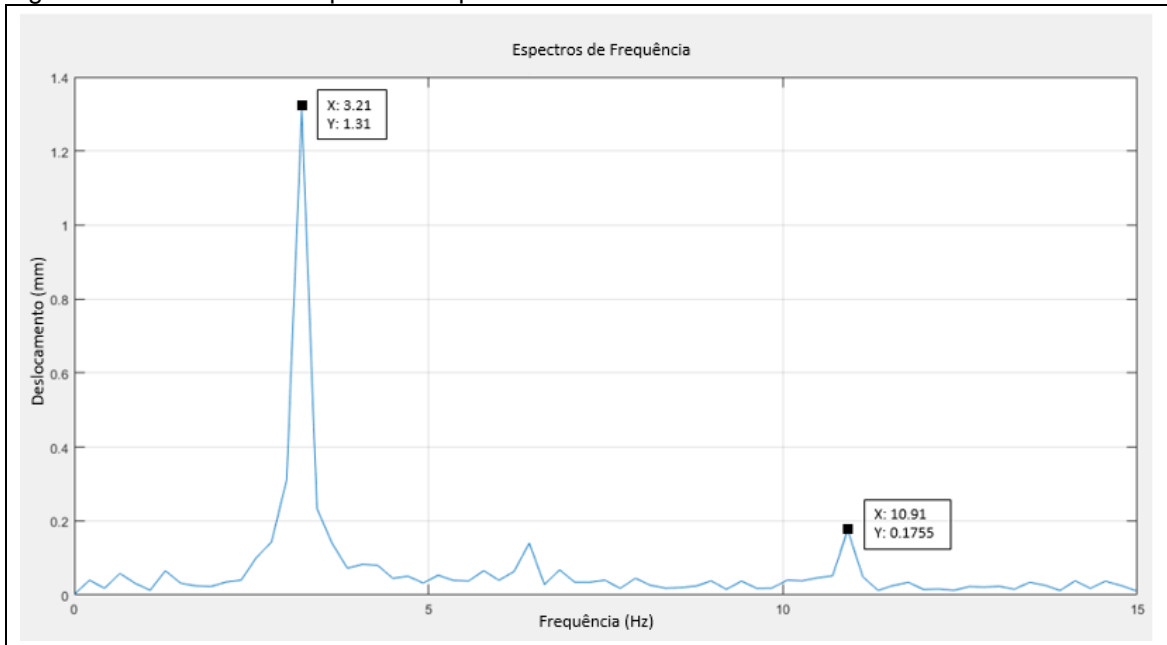


Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos da Figura 4.9 (a), (b) e (c), é possível observar em vermelho a reconstrução dos sinais através do processo de interpolação, conforme abordado na subseção 3.3.1 Marcação Temporal.

Concomitantemente à análise de deslocamento, foi feita a análise dos picos de frequência. Na Figura 4.10 podem ser observadas as estimativas de frequências obtidas pela metodologia e adquiridas através da aplicação da transformada rápida de Fourier aos sinais de deslocamento. Observando a Figura 4.10, pode-se observar os picos de interesse.

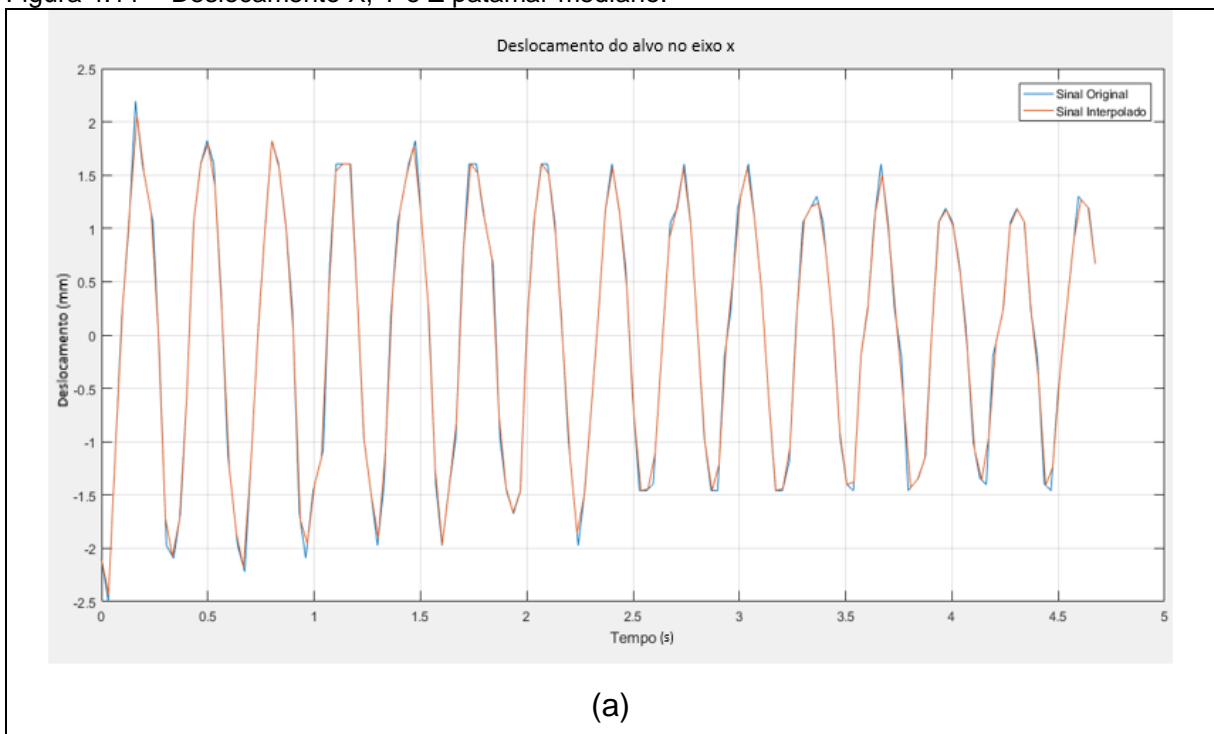
Figura 4.10 – Picos de Frequência no patamar inferior.



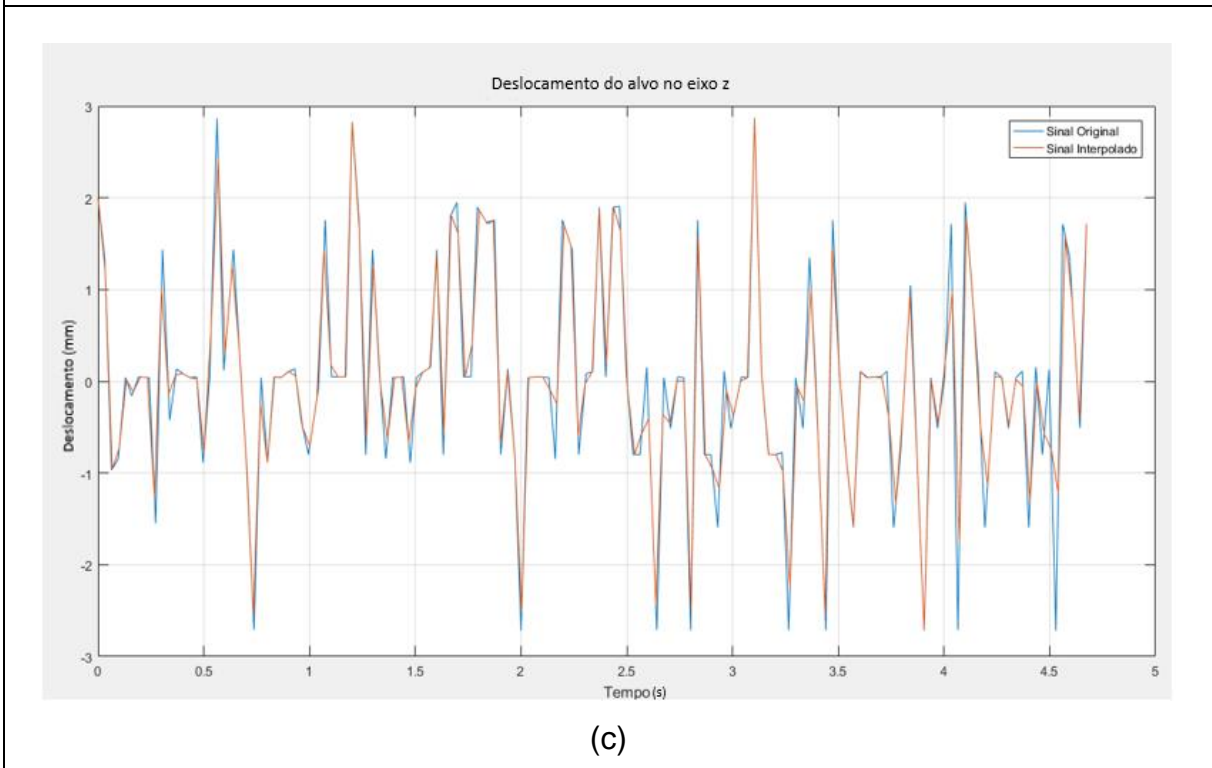
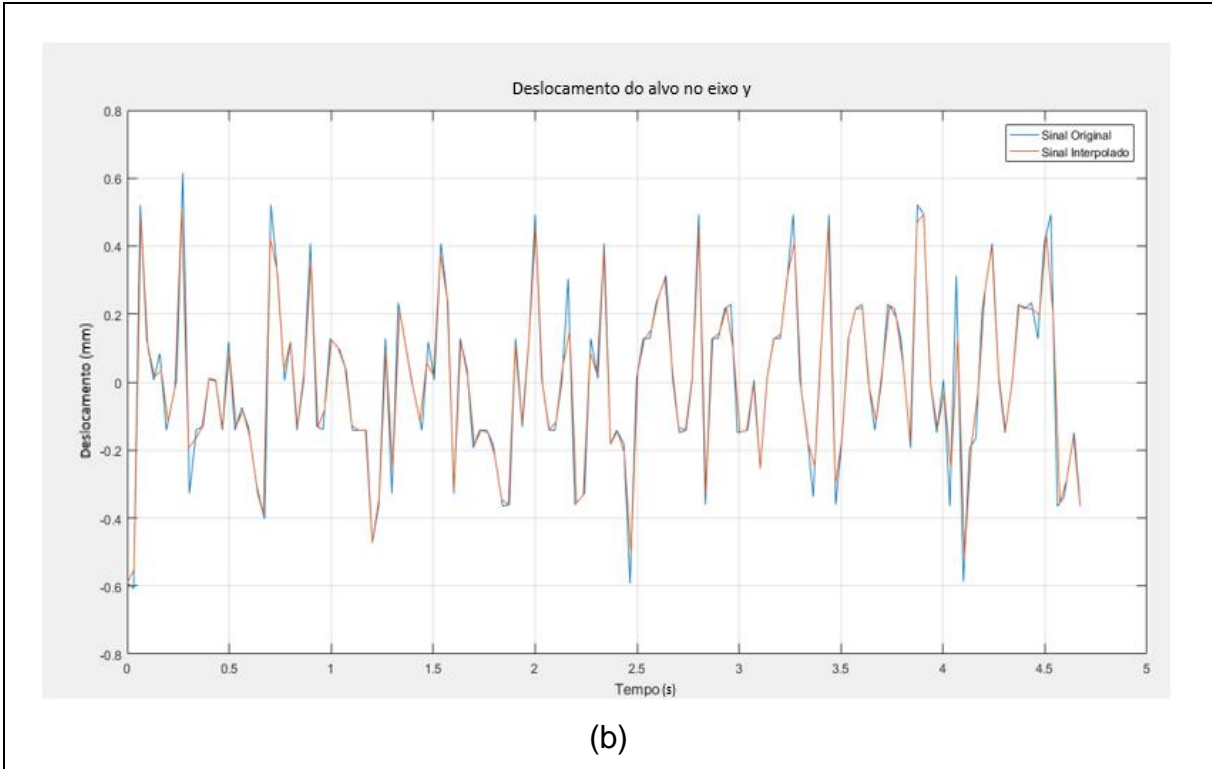
Fonte: Autoria própria.

A metodologia para detecção de movimento e determinação de frequência foi aplicada no processamento das imagens dos alvos, em cada um dos patamares da estrutura. Na Figura 4.11, é possível observar o deslocamento do alvo detectado pelo algoritmo, no patamar mediano da estrutura, nas posições X (a), Y (b) e Z (c).

Figura 4.11 – Deslocamento X, Y e Z patamar mediano.



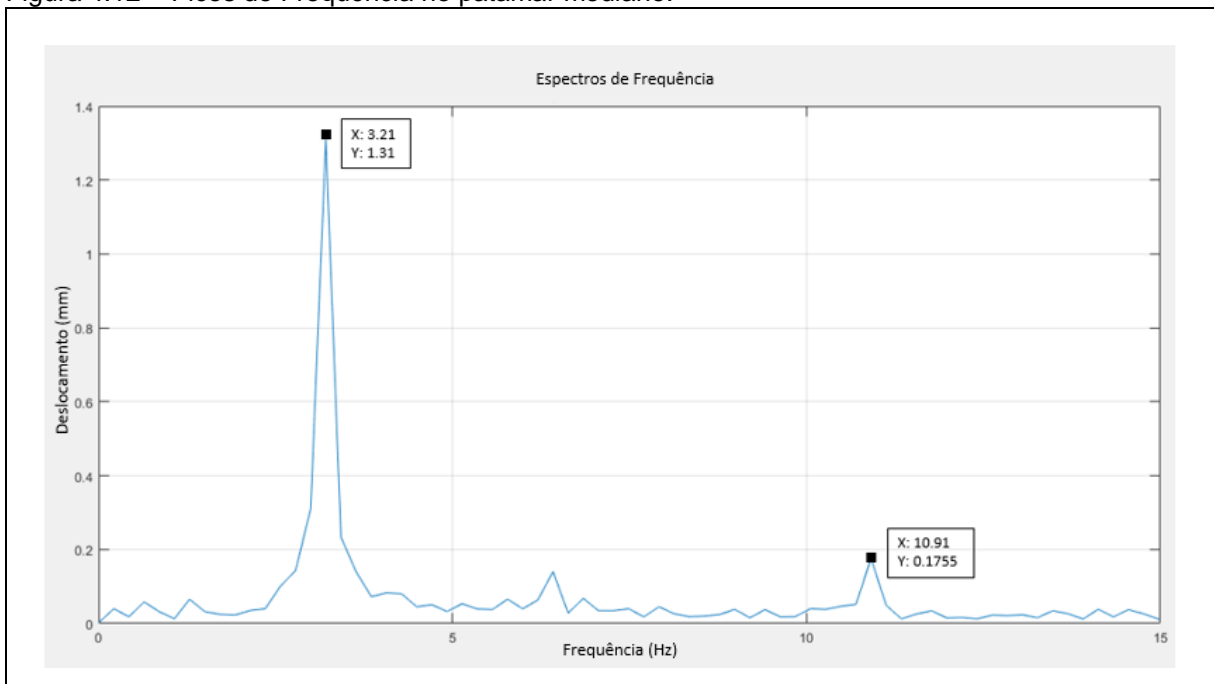
(a)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.12 evidencia as frequências encontradas no patamar mediano da estrutura.

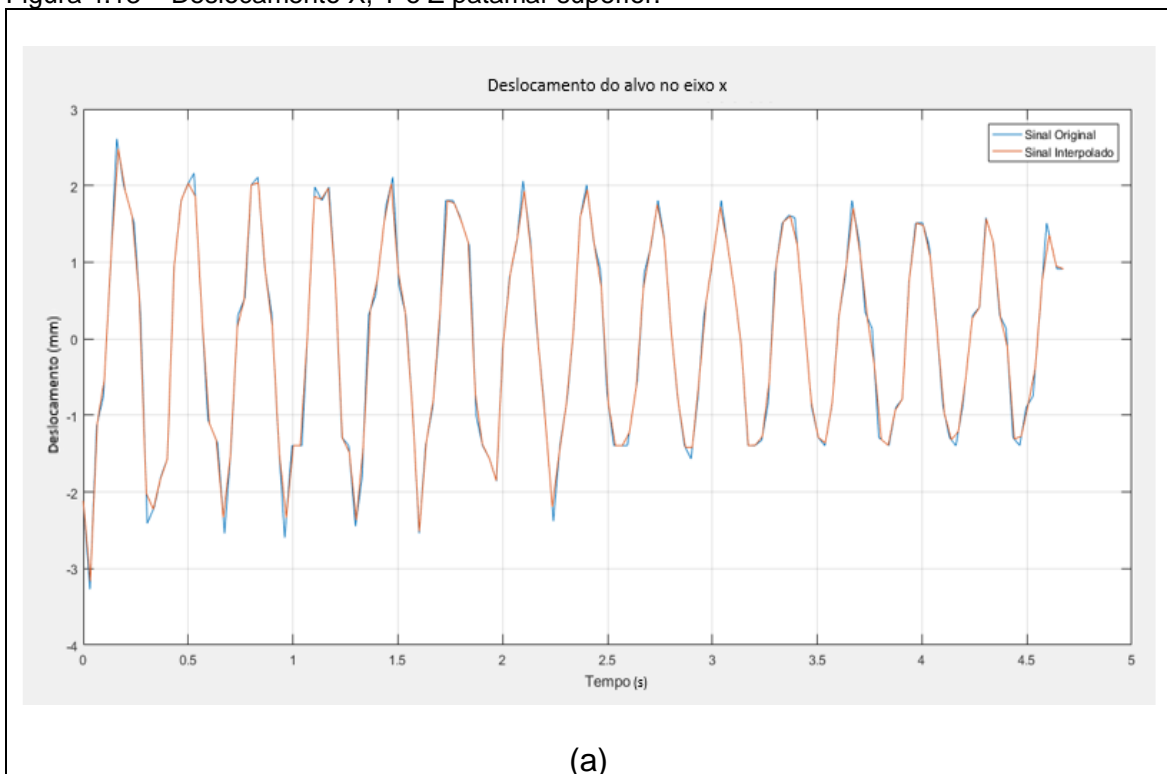
Figura 4.12 – Picos de Frequência no patamar mediano.

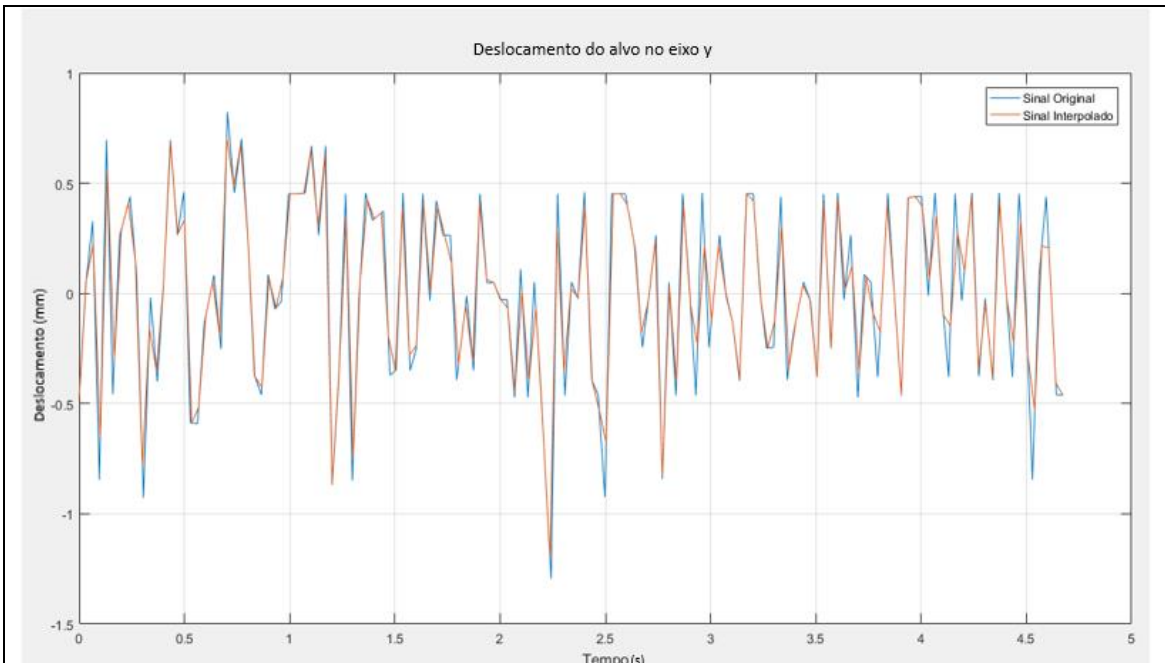


Fonte: Autoria própria.

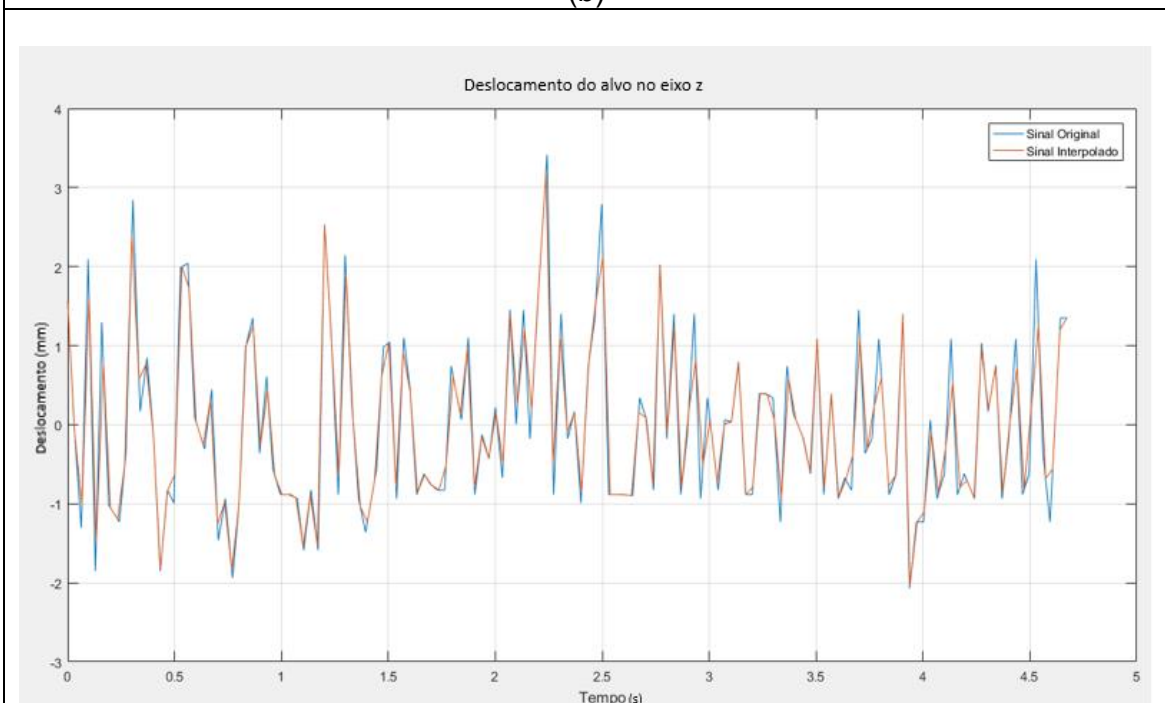
Na Figura 4.13, é possível verificar o resultado do deslocamento observado pelo algoritmo, no patamar superior da estrutura.

Figura 4.13 – Deslocamento X, Y e Z patamar superior.





(b)

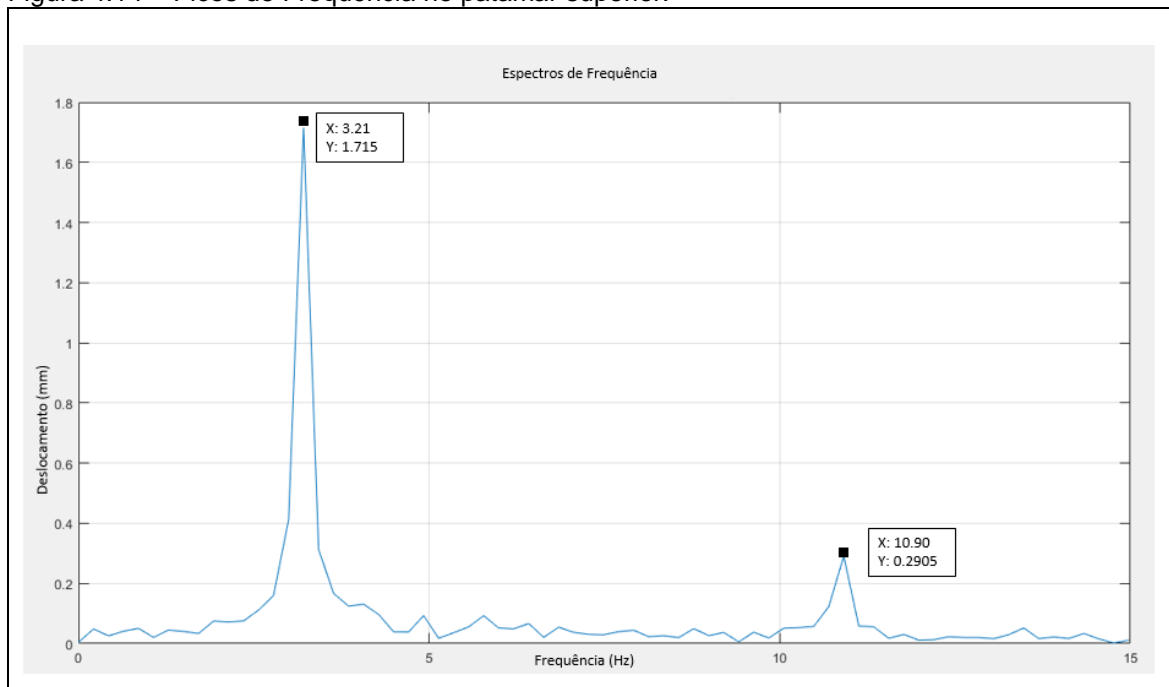


(c)

Fonte: Autoria própria.

E por fim, a Figura 4.14, ilustra os picos de frequência encontrados pela metodologia, no patamar superior da estrutura.

Figura 4.14 – Picos de Frequência no patamar superior.



Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos de deslocamento das Figuras (4.9 (a), 4.11 (a) e 4.13 (a)) é possível observar o comportamento identificado pelo algoritmo, 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 (4.9 (b), 4.11 (b), 4.13 (b)) e (4.9 (c), 4.11 (c) e 4.13 (c)), que ilustram os deslocamentos percebidos pelo algoritmo nos eixos Y e Z de cada patamar, 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; 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.

Quanto aos gráficos das Figuras (4.10, 4.12 e 4.14), é possível identificar dois picos de frequência conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Picos de Frequências metodologia proposta

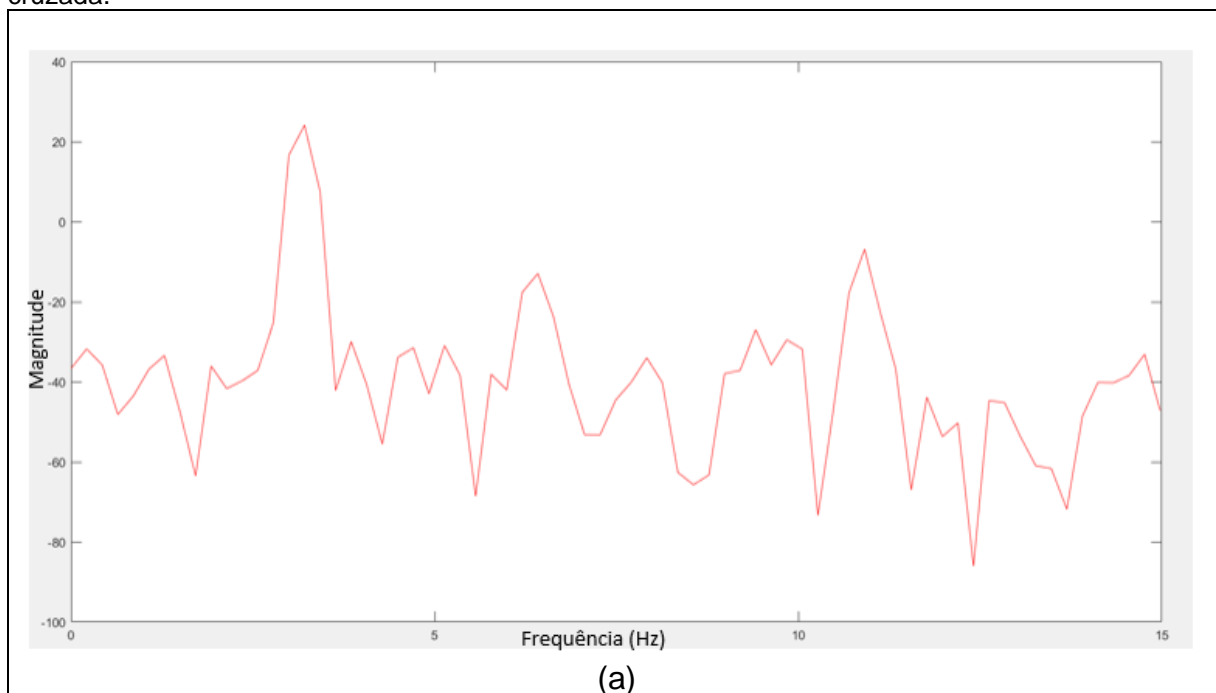
Patamar Estrutural	Primeiro Pico (Hz)	Segundo Pico (Hz)
Inferior	3,21	10,91
Mediano	3,21	10,91
Superior	3,21	10,90

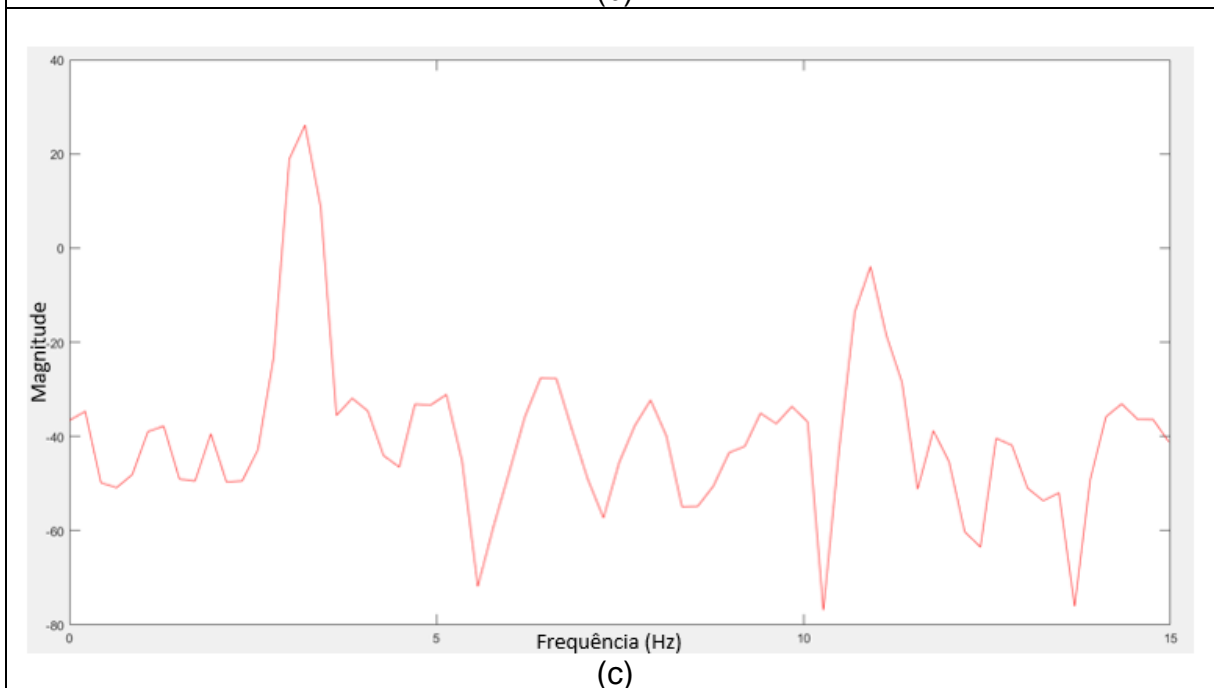
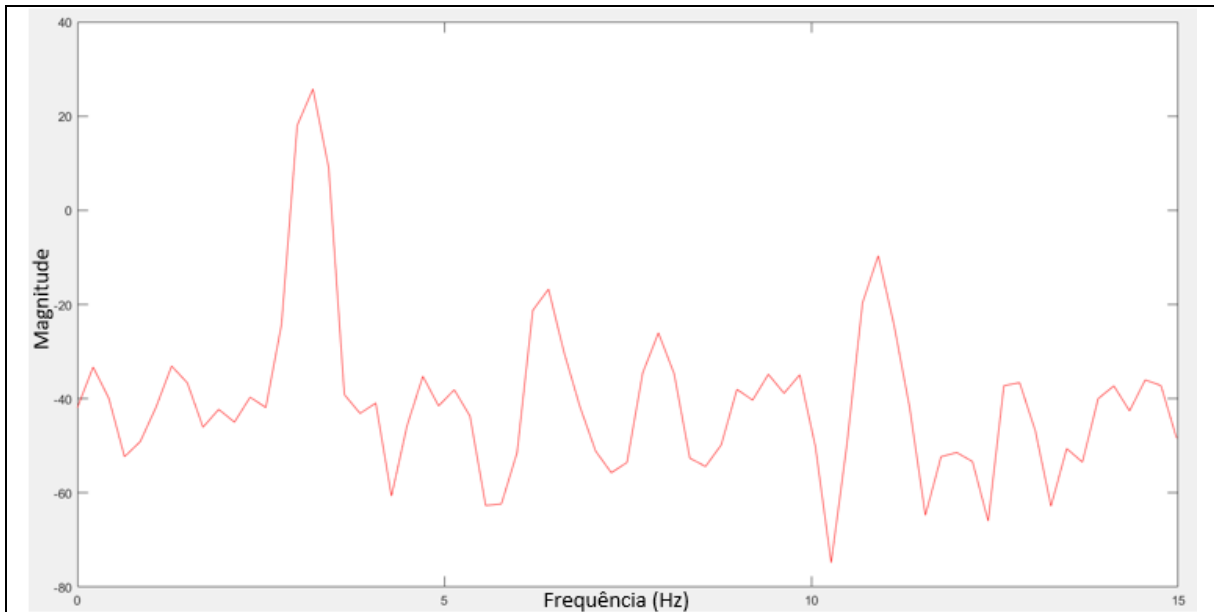
Fonte: Autoria própria.

Com base na identificação dos picos de frequência, foram geradas as densidades espectrais de potência e densidades espectrais cruzadas. No presente trabalho foi adotado como referência, para criação das densidades, o patamar inferior. Dessa forma, gerou-se a densidade espectral de potência do patamar inferior e, dos patamares mediano e superior, as densidades espectrais cruzadas. Na sequência, foi realizada a identificação dos parâmetros modais.

A Figura 4.15, ilustra as densidades espectrais de potência (a) e cruzadas (b) e (c).

Figura 4.15 – Densidades Espectrais, (a) densidade espectral de potência, (b) e (c) densidade espectral cruzada.





Fonte: Autoria própria.

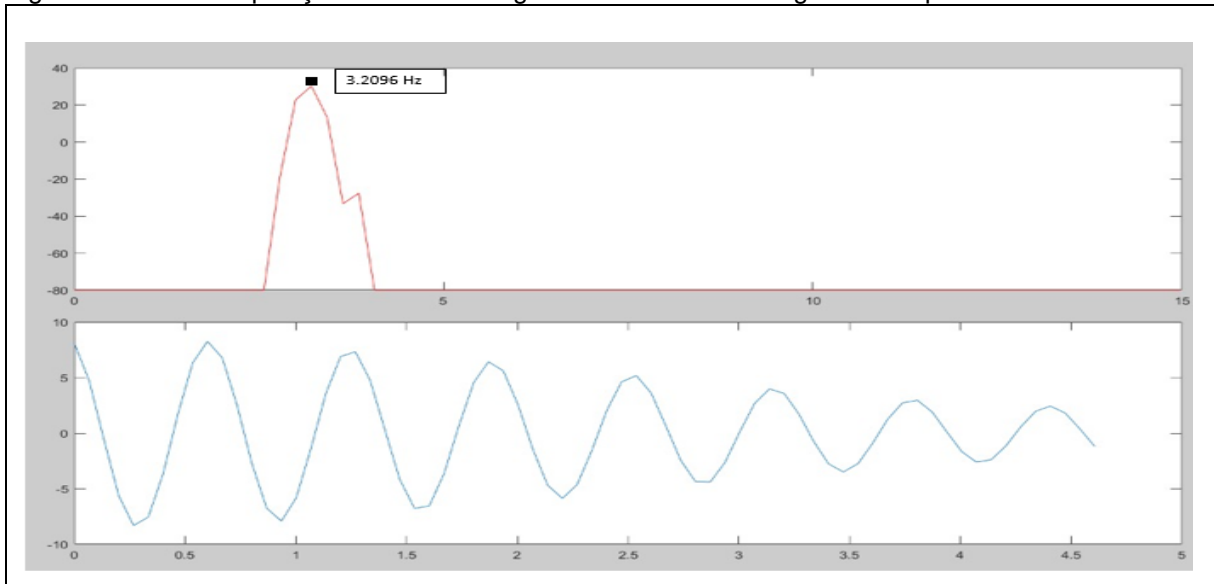
Para a identificação dos parâmetros modais, foi necessário selecionar o pico de interesse e, posteriormente, o EMA realiza a decomposição de valores singulares (SVD) das respectivas funções de densidades, para as linhas de frequência em torno do pico de ressonância.

Uma vez estimado o modo de vibrar referente ao pico de interesse, foi feita uma busca dos vetores singulares em torno do pico de frequência correlacionado com o modo. Essa correlação foi definida para MAC-valores maiores que 0,7 e o processo

termina quando é encontrado algum valor singular com correlação inferior a este índice (BORGES, 2006).

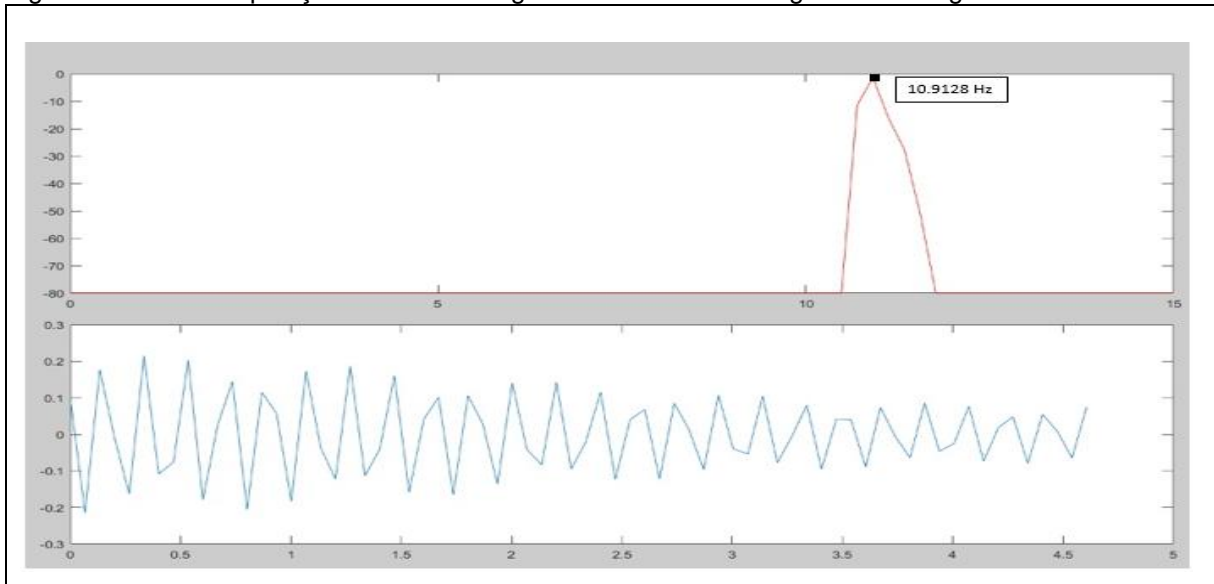
Através do conceito de decremento logaritmo apresentado por Borges (2006), é possível obter o amortecimento dos modos de vibrar, por meio da transformação da densidade espectral para o domínio do tempo, utilizando a transformada inversa de Fourier. Nas Figuras 4.16 e 4.17 pode-se observar os amortecimentos do primeiro e segundo modo de vibrar, respectivamente.

Figura 4.16 – Decomposição de valores singulares e decaimento logaritmo do primeiro modo de Vibrar.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.17 – Decomposição de valores singulares e decaimento logaritmo do segundo modo de Vibrar.

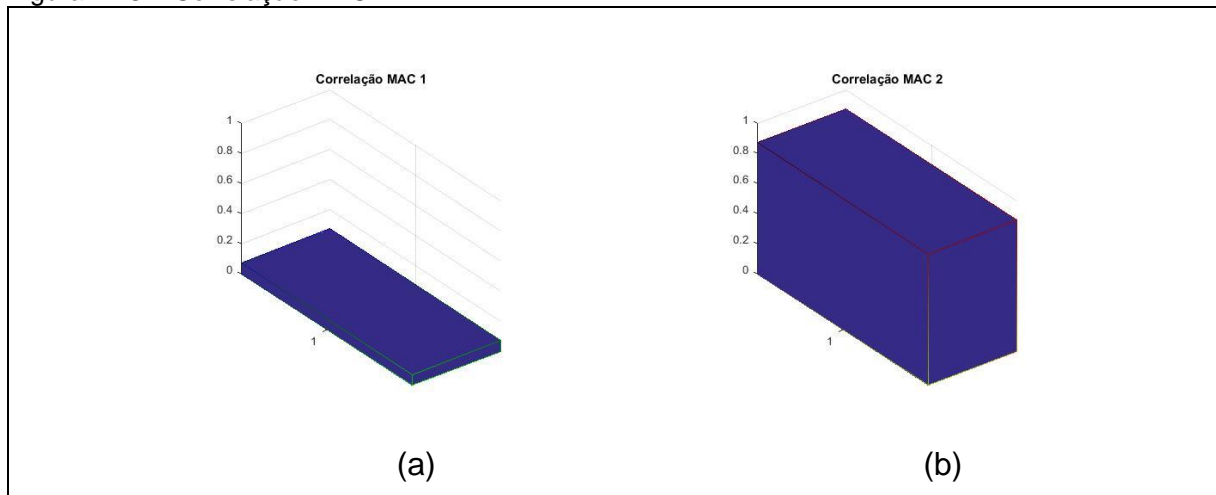


Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 as frequências dos modos de vibrar são identificadas através da análise modal realizada pelo EMA.

Segundo Borges (2006), a partir do cálculo dos MAC-valores é possível realizar a comparação da correlação dos modos encontrados entre diferentes métodos. O coeficiente MAC foi então calculado e as correlações podem ser observadas na Figura 4.18 a correlação MAC 1 (a) apresenta a comparação entre o primeiro modo encontrado pela metodologia proposta e o segundo modo do método clássico, o valor MAC foi estimado em 0,07 evidenciando nenhuma correlação entre os modos. No MAC 2 (b), foi feita a comparação entre o segundo modo obtido pela metodologia proposta e o segundo modo obtido pelo método clássico, o MAC foi estimado em 0,8728 evidenciando uma boa correlação entre os modos obtidos com métodos distintos.

Figura 4.18 – Correlação MAC.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Comparação dos resultados.

	Metodologia Proposta (Câmera)	Método Clássico (Acelerômetro)	Erro frequência (%)	MAC (%)
Modo	Frequência (Hz)	Frequência (Hz)		
1º	3,21	-	-	-
2º	10,91	10,77	1,30	87,28
3º	-	19,12	-	-

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 2 é possível observar que a presente metodologia foi capaz de identificar o primeiro modo, enquanto que, ao utilizar métodos clássicos isso não foi possível. Esta observação fica melhor evidenciada quando observa-se as FRF(s) apresentadas na Figura 4.3, em que não são notados quaisquer picos na faixa de frequência de 0 a 5 Hz. Isto se deve, principalmente, a características construtivas do sistema de aquisição clássico, em que os acelerômetros dificilmente conseguem adquirir sinais abaixo de 5 Hz. Em contrapartida, a metodologia proposta se mostrou satisfatória para a aquisição nesta faixa de frequência.

Já no segundo modo, ambas as metodologias se mostraram satisfatórias para a identificação dos parâmetros modais, enquanto, para o terceiro modo, a presente metodologia não foi capaz de identificar tais parâmetros. Isso já era esperado, dado que a câmera utilizada permite a aquisição máxima de aproximadamente 30 fps e, obedecendo o teorema de Nyquist, não é possível adquirir fenômenos vibratórios maiores que 15 Hz.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs uma metodologia de aquisição de imagens, que possibilita a identificação dos parâmetros modais de uma bancada, construída com três patamares estruturais. Para tanto, foram utilizadas as sub rotinas existentes nos *softwares* VODCA, Takahama (2019) e EMA, Borges (2006).

Nessa metodologia, o primeiro *software*, é responsável pela captura das imagens, de forma sincronizada, possibilitando seu processamento através da identificação dos alvos, separação dos alvos do resto da cena, cálculo dos centroides, e demais procedimentos que possibilitam a identificação dos deslocamentos capturados. O sincronismo entre as câmeras na etapa de calibração (pré-processamento) é importante porque fornece informações determinantes para a aquisição das imagens, tais como, os fatores extrínsecos e intrínsecos do par de câmeras, que são posteriormente utilizados pelas sub rotinas da etapa de pós-processamento, é importante salientar, que na etapa de pós processamento, o código recebeu algumas novas implementações que possibilitaram a geração de densidades espectrais. Na metodologia proposta, as análises foram feitas apenas com as respostas do sistema, uma vez que a força de entrada não foi medida.

O segundo *software* é responsável pela análise dos dados obtidos pelo processamento das imagens, e permite a realização da análise modal baseada apenas nas respostas do sistema. Tal análise foi confrontada com os dados obtidos através do método clássico, que utiliza acelerômetros. Nesse contexto, é importante salientar que a análise modal dos dois métodos foi realizada através do EMA, diferindo na forma de aquisição dos dados densidade espectral (metodologia proposta) e FRF (metodologia clássica).

A realização dos experimentos evidenciou algumas características particulares a cada método. A metodologia proposta apresentou limitações quando analisadas bandas de frequência superiores a 15 Hz. Tal situação é abordada pelo Teorema de *Nyquist*, segundo o qual para que a correta aquisição de um sinal variando continuamente no tempo ocorra, é necessário que a taxa de amostragem deste sinal seja, no mínimo, duas vezes o valor da frequência máxima desempenhada pelo objeto em estudo.

A Tabela - 2 evidencia que o segundo modo de vibrar, comum nos dois métodos, apresentou um bom nível de correlação, constatado pelo valor MAC de 87% e pela proximidade entre as frequências encontradas, 10,91 Hz (câmera) e 10,77 Hz (acelerômetros), um erro de aproximadamente 1,8%.

Observados os resultados e considerações, pode-se concluir que a metodologia proposta se mostrou como uma ferramenta viável para o fornecimento de dados para realização de análises modais. Com relação à limitação em analisar altas bandas de frequência, pode ser sanada utilizando câmeras que possibilitam uma maior taxa de aquisição de fps, o que poderá ser abordado em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ALLEMANG, R. J. **The modal assurance criterion – Twenty years of use and abuse**. Journal of Sound and Vibration. p.14-21, ago. 2003.

APTINA IMAGE CORPORATION. **An objective look at FSI and BSI**. [S. l.], 2010.

AY, E. et al. **Modal Analysis of Lenses Used in Automotive Lighting Industry and Obtaining MAC Matrix**. International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS). v. 11, p. 401-413, jul. 2019.

BARTILSON, D. T.; WIEGHAUS, K. T.; HURLEBAUS, S. **Target-less computer vision for traffic signal structure vibration studies**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 60, p. 571-582, 2015.

BEBERNISS, T. J.; EHRHARDT, D. A. **High-speed 3D digital image correlation vibration measurement: Recent advancements and noted limitations**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 86, p. 35-48, 2017.

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.

BHARADWAJ, K. et al. **Full-field strain prediction using mode shapes measured with digital image correlation**. Measurement. v. 139. p. 326-333, mar. 2019.

BORGES, A. S. **Análise modal baseada apenas na resposta - decomposição no domínio da frequência**. 2006, 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, SP, 2006.

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/>. Acesso em 05 mai. 2019

BRINCKER, R. et al. **Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition.** Proceedings of the XVIIIIMAC. 2000.

CAETANO, E.; SILVA, S.; BATEIRA, J. **A vision system for vibration monitoring of civil engineering structures.** Experimental Techniques. v.35, p. 74-82, ago. 2011.

CASCIATI, F.; FUGGINI, C. **Monitoring a steel building using GPS sensors.** Smart Structures and Systems. v. 7, p. 349-363, maio. 2011.

CASCIATI, F.; WU, L. **Local positioning accuracy of laser sensors for structural health monitoring.** Structural Control and Health Monitoring. v. 20, p. 728-739, 2013.

CUNHA, A.; CAETANO, E. **Reanálise dos ensaios dinâmicos da ponte Vasco da Gama com base no método de identificação estocástica por sub-espacos.** Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. p. 747-756, 2004

DE BOOR, C. et al. **A practical guide to splines.** New York: springer-verlag, 1978.

ESLAMINEJAD, A.; ZIEJEWSKI, M.; KARAMI, G. **An experimental–numerical modal analysis for the study of shell-fluid interactions in a clamped hemispherical shell.** Applied Acoustics. v. 152, p. 110–117, abr. 2019.

FELBER, A. **Development of a Hybrid Bridge Evaluation System.** Tese de Pós-Doutorado. University of British Columbia, 1993.

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

FREITAS, T. C. **Identificação de parâmetros modais utilizando apenas as respostas da estrutura: identificação estocástica de subespaço e decomposição no domínio da frequência.** 2006. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, SP, 2008.

FUKUDA, Y. et al. **Vision-Based Displacement Sensor for Monitoring Dynamic Response Using Robust Object Search Algorithm.** Sensors Journal, IEEE. v. 13, p. 4725-4732, 2013.

FUKUDA, Y.; FENG M. Q.; SHINOZUKA, M. **Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures.** Structural Control and Health Monitoring. v. 17, p. 918-936, 2010.

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

GEHLE, R. W.; MASRI, S. F. **Tracking the multi-component motion of a cable using a television camera.** Smart Materials and Structures. v. 7, p. 43-51, jan. 1998.

GENTILE, C.; BERNARDINI, G. **An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests.** Structure and Infrastructure Engineering. v. 6, p. 521-534, 2009.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing.** [S. l.]: Prentice Hall, 2002.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais. 3. ed.** São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

HU, Y. et al. **Local damage detection of membranes based on Bayesian operational modal analysis and three-dimensional digital image correlation.** Mechanical Systems and Signal Processing. v. 131, p. 633–648, jun. 2019.

HUNADY, R.; PAVELKA, P.; LENGVARSKY, P. **Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation**. Mechanical Systems and Signal Processing. v. 121, p. 201-2014, abr. 2019.

IBRAHIM, S. R.; MIKULCIK, E. C. **A Time Domain Modal Vibration Test Technique**. The Shock and Vibration Bulletin, v. 43, n 4, p. 21-37, 1973.

JI, Y.; CHANG, C. **Nontarget Image-Based Technique for Small Cable Vibration Measurement**. Journal of Bridge Engineering. v.13, p. 34-42, 2008.

JULIANI, T. M. **Deteção de danos em pontes em escala reduzida pela identificação modal estocástica**. 2014. 190f. Dissertação (Mestrado em engenharia de estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2014.

KEESE, A. **Teoria das cores**. Disponível em:<https://www.academia.edu/6767079/TEORIA_DE_CORES_ALEXANDRE_KEESE_TEORIA_DE_CORES> Acesso em: 05 nov. 2019.

KIM, S. W. et al. **Vision-based monitoring system for evaluating cable tensile forces on a cable-stayed bridge**. Structural Health Monitoring. v. 12, p. 440-456. 2013.

KLOUTSEY, A. E. H.; DINIZ, A. C. G. C.; VILLA, C. V. S. **Influência das Condições de Contorno na Análise Modal Experimental de Vigas**. 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

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

KUMARI, G.; BANIK, S.; PREMI, M. S. G. **“Strain measurement using 3D stereo image correlation”**. In: Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2015 International Conference on. IEEE, p. 1-5. 2015.

LARDIES, J.; MINH-NGI, T. **Modal Parameter identification of stay cables from output only measurements**. Mechanical Systems and Signal Processing, London, v. 25, n.1, p. 133-150. 2011.

LEE, J. J.; SHINOZUKA, M. **A vision-based system for remote sensing of bridge displacement**. NDT & E International. v. 39, p. 425-431. 2006.

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.

LIN, H. A. et al. **Object Localization and Segmentation Using Hybrid Features and Fuzzy Classifiers With a Small Training Set from an RGB-D Camera**. The Eleventh International Conference on Advanced Computation Intelligence. p.239-243, jun. 2019

LOBÃO, F. S. **Calibração com mapeamento das distorções geométricas aplicada a um sistema de visão estéreo**, 2004, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

MAITRE, H. **From Photon to Pixel: The Digital Camera Handbook**. John Wiley & Sons, 2015.

MITCHELL, J. S. **From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance**. San Juan Capistrano, California, 2008.

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.

NGUYEN, M. et al. **Modal Identification of Output-Only Systems of Composite Discs Using Zernike Modes and MAC**. Sensors. v. 19, fev. 2019.

NISHIDATE, I. et al. **RGB camera-based noncontact imaging of plethysmogram and spontaneous low-frequency oscillation in skin perfusion before and during psychological stress**. SPIE. v. 10885. jan. 2019.

OPPENHEIM, A. V.; SHAFER, R. W. "**Discrete-Time signal Processing**", Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.

PARK, S. W. et al. **3D displacement measurement model for health monitoring of structures using a motion capture system**. Measurement, v. 59, p. 352-362, 2015.

PARRA, C. **A Novel Method to Estimate the Position of a Mobile Robot in Underfloor Environments Using RGB-D Point Clouds**. IEEEAccess. v. 8, p.9084-9101, jan. 2020.

PINOLI, J. **Mathematical foundations of image processing and analysis**. John Wiley & Sons. 2014.

RIBEIRO, D. et al. **Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system**. Engineering Structures. v. 75, p. 164-180, 2014.

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.

SABINO, D. D. **Medidas de deslocamento e vibrações através de imagens de câmeras digitais**. 2013. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho" Ilha Solteira, 2013.

SCURI, A. E. **Fundamentos da Imagem Digital**. Rio de Janeiro : Tecgraf / PUC-Rio, 2002. Disponível

em:<<http://www.inf.ufes.br/~thomas/graphics/www/apostilas/CIV2801ScuriImgDigital.pdf>> Acesso em: 15 out. 2019.

SHANG, Y. et al. **Displacement and deformation measurement for large structures by camera network**. Optics and Lasers in Engineering, v. 54, p. 247-254, 2014.

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.

SRIVASTAVA, V.; BAQERSAD, J. **A multi-view optical technique to extract the operating deflection shapes of a full vehicle using digital image correlation**. Thin-Walled Structures. v. 145, set. 2019.

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.

TROTTA, M. 2011. **Fotografia: Objetiva (lente) Leica cortada ao meio**. Disponível em: <<http://www.marcustrotta.com/2011/05/20/fotografia-objetiva-lente-leica-cortada-ao-meio/>>. Acesso em: 10 nov. 2019.

UEHARA, D.; SIROHI, J. **Full-field optical deformation measurement and operational modal analysis of a flexible rotor blade**. Mechanical Systems and Signal Processing. v. 133, p. 106265, jul. 2019.

WAHBEH, A. M.; JOHN, P. C.; SAMI, F. M. **A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems**. Smart Materials and Structures. v. 12, p. 785-794, set. 2003.

WANG, W. et al. **Vibration measurement method based on point tracking for irregular structures**. Optik-International Journal of light and Electron. v. 176, p. 482-790, jan. 2019.

WU, L. J.; CASCIATI, F.; CASCIATI, S. **Dynamic testing of a laboratory model via vision-based sensing**. Engineering Structures. v. 60, p. 113-125, fev. 2014.

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.

APÊNDICE A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA METODOLOGIA

Esse anexo tem como objetivo apresentar os equipamentos utilizados pela metodologia proposta, bem como suas respectivas especificações. As informações foram obtidas nos endereços eletrônicos de seus fabricantes.

• Placa de Aquisição e Geração de Sinais



Fabricante: Data Physics®

Modelo: Quattro

Especificações:

INPUT

2 to 4 channels
 ADC Resolution (Analog AAF): 24-bits
 Sample Resolution (Digital AAF): 32-bit floating point
 Coupling: AC/DC, DIFF/SE, ICP, TEDS
 Anti-alias Filters: 100 dB protection, all ranges
 Dynamic Range: 120 dB
 Input Ranges: 0.1, 1, 10 V Full Scale (20 V optional)
 Input Impedance:
 100 k Ω symmetric for Diff;
 100 k Ω with 50 Ω shield to GND for SE
 Max Input Voltage: 80 vPeak, 2.5 vRmsShield (SE)
 CMRR: 60 dB (typical), $f < 40$ kHz
 Amplitude Accuracy:
 +/- 0.020 dB (0.2% FS) at 1 kHz for 15° C < T < 40° C
 Amplitude Ripple: (Digital AAF) - 0.005 dB for 0 < f < FS / 2.56
 Amplitude Droop:
 (Analog AAF) - 0.005 dB at 5 kHz; 0.010 dB at 25 kHz;
 0.050 dB at 49 kHz
 Residual Offset: +/- 0.1% FS AND not larger than 3 mvDC
 Phase Accuracy: 0.05° to 0.5° for DC to 40 kHz
 Crosstalk between Inputs: < -100 dB
 Crosstalk between inputs and source: < -90 dB
 THD: -100 dB @ 1 kHz
 Minimum SampleRate: < 1 Sps
 Maximum SampleRate: 102.4 kHz standard (204.8 kHz optional)
 Maximum useful Frequency: 40 kHz standard (94 kHz optional)
 Frequency Accuracy: 25 ppm
 Time Accuracy: 25 ppm

TACHOMETER INPUT

1 channel
 Maximum Frequency: 200 kHz
 Input Range: +/- 24 V FS
 Adjustable threshold, holdoff, prescaling

OUTPUT

1 to 2 channels
 Dynamic Range: > 100 dB
 Resolution: 24-bit
 Voltage Range: 10 V FS
 Output Current: 1 mA min., continuous short
 THD: -100 dB @ 1 kHz
 Output Waveforms: 65536 max blocksize for arbitrary; unlimited for recorded (optional)

• Martelo de Impacto



Fabricante: PCB Piezotronics®

Modelo: 086C01

Especificações:

	ENGLISH:	SI:	
PERFORMANCE			
Sensitivity ($\pm 15\%$)	50 mV/lbf	11.2 mV/N	
Measurement Range	± 100 lbf pk	± 444 N pk	
Resonant Frequency	≥ 15 kHz	≥ 15 kHz	
Non-Linearity	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	
ELECTRICAL			
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	<100 Ohm	<100 Ohm	[1]
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC	
Discharge Time Constant	≥ 500 sec	≥ 500 sec	[1]
PHYSICAL			
Sensing Element	Quartz	Quartz	
Sealing	Epoxy	Epoxy	
Hammer Mass	0.23 lb	0.10 kg	
Head Diameter	0.62 in	1.57 cm	
Tip Diameter	0.25 in	0.63 cm	
Hammer Length	8.5 in	21.6 cm	
Electrical Connection Position	Bottom of Handle	Bottom of Handle	
Extender Mass Weight	0.9 oz	25 gm	
Electrical Connector	BNC Jack	BNC Jack	

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.

CE

PRODUCT NOTES

Dados de Calibração:

~Calibration Certificate~

Model No.: 086C01 Customer: _____Serial No.: 35981 _____Description: Impulse Force Hammer PO No.: _____Manufacturer: PCB Calibration Method: Impulse (AT-303-1)**Data**Output Bias: **9.8** Temperature: **74 °F** **24 °C** Relative Humidity: **39 %****HAMMER SENSITIVITY:**

Tip		Plastic/Vinyl, with tuning mass.	Plastic/Vinyl, with tuning mass.	Plastic/Vinyl
Hammer Configuration	Extender	None	Aluminum	None
Hammer Sensitivity	mV/lb	54.10	56.27	50.66
	(mV/N)	12.16	12.65	11.39

Above data is valid for all supplied tips.

Condition of Unit:As Found *N/A*As Left *New Unit, In Tolerance***Notes:**

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 683/283498 and PTB Traceable thru Project 10065.
2. This certificate may not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc..
3. Calibration is performed in compliance with ISO 10012-1, ANSI/NCSL Z540.3.
4. See Manufacturer's specification sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with a coverage factor of 2) is +/-3.8%.

Technician: Scott Skibniewski Date: 1/28/2015**PCB PIEZOTRONICS™**Headquarters: 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
Calibration Performed at: 10869 Highway 903, Halifax, NC 27839

TEL: 888-684-0013

FAX: 716-685-3886

www.pcb.com

Calibration Station: 55

• Acelerômetro



Fabricante: PCB Piezotronics®

Modelo: 352C22

Especificações:

	ENGLISH:	SI:	
PERFORMANCE			
Sensitivity ($\pm 15\%$)	10 mV/g	1.0 mV/(m/s ²)	
Measurement Range	± 500 g pk	± 4900 m/s ² pk	
Frequency Range ($\pm 5\%$)	1.0 to 10000 Hz	1.0 to 10000 Hz	
Frequency Range ($\pm 10\%$)	0.7 to 13000 Hz	0.7 to 13000 Hz	
Frequency Range (± 3 dB)	0.3 to 20000 Hz	0.3 to 20000 Hz	
Resonant Frequency	≥ 50 kHz	≥ 50 kHz	
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	0.004 g rms	0.04 m/s ² rms	[2]
Non-Linearity	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	[1]
Transverse Sensitivity	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	
ENVIRONMENTAL			
Overload Limit (Shock)	± 10000 g pk	± 98000 m/s ² pk	
Temperature Range (Operating)	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	
Temperature Response	See Graph %/°F	See Graph %/°F	[2]
ELECTRICAL			
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≤ 300 Ohm	≤ 300 Ohm	
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC	
Discharge Time Constant	1.0 to 3.5 sec	1.0 to 3.5 sec	
Settling Time (within 10% of bias)	< 3 sec	< 3 sec	
Spectral Noise (1 Hz)	800 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	7840 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[2]
Spectral Noise (10 Hz)	250 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	2450 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[2]
Spectral Noise (100 Hz)	60 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	590 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[2]
Spectral Noise (1 kHz)	50 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	490 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[2]
Spectral Noise (10 kHz)	40 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	392 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[2]
Electrical Isolation (Base)	> 100000000 Ohm	> 100000000 Ohm	
PHYSICAL			
Size - Height	0.14 in	3.6 mm	
Weight	0.017 oz	0.5 gm	[2]
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	Anodized Aluminum	Anodized Aluminum	
Sealing	Epoxy	Epoxy	
Size - Length	0.45 in	11.4 mm	
Size - Width	0.25 in	6.4 mm	
Electrical Connector	3-56 Coaxial Jack	3-56 Coaxial Jack	
Electrical Connection Position	Side	Side	
Mounting	Adhesive	Adhesive	

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.



PRODUCT NOTES

Dados de Calibração:

~ Calibration Certificate ~
Per ISO 15003-21

Model Number: 352C22

Serial Number: LW185215

Description: ICP® Accelerometer

Manufacturer: PCB Method: Back-to-Back Comparison AT401-3

Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz	10.73 mV/g (1.094 mV/m/s ²)	Output Bias	10.4 VDC
Discharge Time Constant	1.7 seconds	Transverse Sensitivity	1.5 %
		Resonant Frequency	85.7 kHz

Sensitivity Plot

Temperature: 74 °F (23 °C) Relative Humidity: 42 %

Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10	-0.5	300	-0.6	7000	0.2
15	-0.5	500	-0.5	10000	2.6
30	-0.4	1000	-0.4		
50	-0.5	3000	-0.3		
REF. FREQ.	0.0	5000	-0.2		

Mounting Surface: Triples Adapter Fastener: Adhesive Fixture Orientation: Vertical
Acceleration Level (g): 20.0 g (98.1 m/s²)
*The acceleration level may be limited by shaker displacements at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.001 (1/mg) * The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s²

Condition of Unit

As Found: n/a

As Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 683/283498 and PTB Traceable thru Project 10065.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: Hommy Barbosa Date: 1/28/2015

PCB PIEZOTRONICS
VIBRATION DIVISION
Headquarters: 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
Calibration Performed at: 10869 Highway 903, Halifax, NC 27839
TEL: 888-684-0013 FAX: 716-685-1886 www.pcb.com CAL46-3163293472-R390

ACCREDITED
CALIBRATION CERT #1862 02
PAGE 1 OF 1



- **WebCam**



Fabricante: Logitech®

Modelo: C920

Especificações:

Resolução	1080p/30qps 720p/30qps
Qualidade de vídeo	Melhor
Focus	Automático
Lente	Vidro Full HD
Campo de visão	78°

APÊNDICE B – INTERFACE VODCA

- Interface denominada Detecção de Objeto Visual por Análise Computacional ou *Visual Object Detector by Computational Analysis – VODCA*, que reúne todos os algoritmos necessários para a realização da análise proposta pela presente metodologia, de maneira rápida e eficiente.

