

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**GIOVANNI LUIZ FREDO**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO POR CAPTURA  
DE IMAGEM**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2019**

GIOVANNI LUIZ FREDO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO  
POR CAPTURA DE IMAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak

PATO BRANCO

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Desenvolvimento de uma Metodologia para Medição de Vibração por Captura de Imagem

Giovanni Luiz Fredo

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 27/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Giovanni Bratti  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Fábio Rodrigo Mandello Rodrigues  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, sem eles jamais teria chegado até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais Liane e Décio pelo apoio, amor e suporte de sempre. A minha irmã Janaina por todo amor, compreensão e ajuda. A minha namorada Mirian que sempre me apoiou durante esses anos, agradeço pelo amor, carinho, compreensão, suporte, enfim por tudo que faz por mim. Agradeço ao Professor Paulo Novak pela ajuda, paciência, aprendizado e ensinamentos deixados durante esse tempo de convívio. Agradeço aos demais professores e colegas que contribuíram para esta conquista de uma forma ou de outra, além de toda experiência e aprendizado deixados.

## EPÍGRAFE

*I do not know what I may appear to the world, but to myself I seem to have been only like a boy playing on the seashore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me. (NEWTON, Isaac, 1727).*

Eu não sei o que eu posso parecer para o mundo, mas para mim tenho a impressão de ter sido apenas como um menino brincando á beira-mar, e divertindo-me de vez em quando ao encontrar uma pedra mais lisa ou uma concha mais bonita do que comum, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de mim. (NEWTON, Isaac, 1727).

## RESUMO

FREDO, Giovanni L. Desenvolvimento de uma Metodologia para Medição de Vibração por Captura de Imagem. 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo de pesquisas na área de técnicas de medição sem contato. A fotogrametria, que é uma dessas técnicas, tem recebido atenção especial devido a sua praticidade, já que necessita basicamente de uma câmera digital doméstica e um computador, e por sua capacidade de alcançar medições em toda uma estrutura. Esta vem como uma boa opção para substituir outras técnicas que não atendem esses requisitos. Este trabalho aborda o desenvolvimento de uma metodologia para medição de vibração por captura de imagem, utilizando como base a fotogrametria digital. Para isso dois sistemas foram analisados. O primeiro consiste na captação do sinal de um pêndulo simples, comparando os resultados de frequência natural obtidos com um modelo teórico. O segundo consiste em um sistema mecânico de um grau de liberdade, do qual os resultados obtidos foram comparados com a resposta teórica alimentada a partir de um sensor convencional de medição, neste caso foi utilizado um acelerômetro. O cálculo dos deslocamentos foi efetuado pelo algoritmo Correlação de Imagem Digital (DIC). Para ambos os casos foi constatada uma boa concordância nos deslocamentos dos sistemas, assim como a estimativa da frequência natural de cada, da qual foram registrados diferenças de até 5,3%.

**Palavras-chave:** Captura de Imagem. Fotogrametria Digital. Frequência Natural. Acelerômetro. Correlação de Imagem Digital. Deslocamento.

## ABSTRACT

FREDO, Giovanni L. Development of a Methodology for Vibration Measurement by Image Capture. 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

In the last decades, there has been a significant increase of researches in the area of non-contact measurement techniques. The photogrammetry, which is one of these techniques, has received special attention due to its practicality, as it requires basically one domestic digital camera and one computer, and due to its capability to achieve full-field measurement. This technique comes as a good option to replace other techniques that don't attend these requirements. This work reports the development of a methodology for vibration measurement by image capture, using as base digital photogrammetry. For this two systems were monitored. The first one consists on the signal capture of a simple pendulum, comparing the achieved results of natural frequency with a theoretic model. The second one consists on a one degree of freedom mechanical system, which the achieved results were compared with the theoretic response fed from a conventional sensor of measurement, in this case an accelerometer was used. The computation of the displacements was made by algorithm Digital Image Correlation (DIC). For both cases a good agreement was detected in the displacements of the systems, as well as the estimation of each natural frequency, which were registered differences until 5,3%.

**Keywords:** Image Capture. Digital Photogrammetry. Natural Frequency. Accelerometer. Digital Image Correlation. Displacement.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenho esquemático construção - Acelerômetro.....	18
Figura 2 – Princípio básico do método de sensoriamento.....	22
Figura 3 – Formação da imagem .....	23
Figura 4 - Etapas do processamento da imagem.....	24
Figura 5 - Exemplo do processo de limiarização.....	25
Figura 6 - Exemplo do processo da determinação da Região de Interesse .....	26
Figura 7 - Pêndulo simples.....	27
Figura 8 - Estudo de rotação de pás altamente flexíveis.....	29
Figura 9 - Esquema generalizado do sistema proposto .....	30
Figura 10 - Vista lateral do pêndulo.....	31
Figura 11 - Aparato experimental - Pêndulo.....	32
Figura 12 - Desenho esquemático do sistema .....	32
Figura 13 - Aparato experimental - Barra .....	33
Figura 14 - Resultados para $\theta$ muito pequenos sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência .....	38
Figura 15 - Resultados para $\theta$ maiores sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.....	39
Figura 16 - Resultados para $\theta$ maiores sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.....	39
Figura 17 - Resultados para $\theta$ maiores sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.....	40
Figura 18 - Resultados do caso sem flash sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.....	42
Figura 19 - Resultados do caso com flash sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro comparativo de métodos de sensoriamento de estruturas .....	20
Tabela 2 - Quadro comparativo dos resultados do primeiro experimento .....	38
Tabela 3 - Quadro comparativo dos resultados do segundo experimento .....	41

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear	-
LDV	Vibrômetro Doppler a Laser	-
ESPI	Interferometria Speckler por Padrão Eletrônico	-
FPS	Frames por Segundo	-
DSS	<i>Shearography</i> Speckle Digital	-
PT	Rastreamento de Pontos	-
DIC	Correlação de Imagem Digital	-
FE	Elementos Finitos	-
ODS	Deflexão de Estrutura em Operação	-
SSFD	Sensoriamento via Fotogrametria Digital	-
RMS	Raiz do Valor Quadrático Médio	-
RDI	Região de Interesse	-
CCN	Correlação Cruzada Normalizada	-
RGB	Vermelho Verde Azul	-
EDO	Equação Diferencial Ordinária	-
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural	-
LED	Diodo Emissor de Luz	-
FFT	Transformada Rápida de Fourier	-

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Objetivos Específicos .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA .....	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA VIBRAÇÃO .....	16
2.1.1 Vibração Livre .....	16
2.1.2 Vibração Forçada .....	17
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES CONVENCIONAIS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO .....	17
2.3 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO POR IMAGEM: ANÁLISE VIA FOTOGRAMETRIA .....	21
2.3.1 Formação da Imagem .....	22
2.3.2 Processamento da Imagem .....	24
2.3.2.1 Limiarização .....	25
2.3.2.2 Determinação da Região de Interesse .....	25
2.3.2.3 Interpolação entre pixels .....	26
2.3.2.4. Cálculo do deslocamento via função de Correlação Cruzada Normalizada .....	26
2.4 O PÊNDULO SIMPLES .....	27
2.5 APLICAÇÕES PRÁTICAS DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRIA EM DINÂMICA ESTRUTURAL .....	28
<b>3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)</b> .....	<b>30</b>
3.1 PROCESSO COMPUTACIONAL .....	30
3.2 SISTEMAS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO .....	31
3.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO .....	36
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>37</b>

4.1 RESULTADOS PRIMEIRO EXPERIMENTO .....	37
4.2 RESULTADOS SEGUNDO EXPERIMENTO .....	41
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>44</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	45
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de uma manutenção adequada e de alta qualidade na indústria vem aumentando com o passar do tempo, pois cada vez mais se procura a diminuição de gastos, o aumento da produção e, conseqüentemente, o menor tempo possível com a produção parada.

É nessa linha de pensamento que se encaixa a ideia deste trabalho, já que a análise de vibrações é uma das técnicas mais utilizadas na manutenção preditiva, a qual busca monitorar o desempenho das máquinas, detectar falhas e problemas de operação, assim como na fase de projeto do componente ela possui extrema importância em seu dimensionamento.

A análise de vibrações por captura de imagem vem como uma alternativa de menor custo relativo e mais simples quando comparada à métodos tradicionais de medição de vibrações, como acelerômetros, já que não necessita de contato direto com o componente e para realizar o procedimento faz-se necessário apenas uma câmera, de um celular por exemplo, e um computador.

### 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de medição de vibração por câmeras fotográficas digitais, usando a fotogrametria digital.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma metodologia para medição de vibração por captura de imagem;
- Analisar resultados obtidos no código e comparar com dois casos teóricos: Pêndulo simples e uma barra com uma mola acoplada;
- Identificar as limitações e condições do método proposto;
- Analisar os parâmetros que podem influenciar na captura da imagem.

### 1.2 JUSTIFICATIVA

O investimento em pesquisa no setor de análise de vibrações por processamento de imagem vem aumentando nos últimos anos, devido a isso, juntamente com o custo e limitações dos aparelhos tradicionais surgiu a ideia em realizar e desenvolver este trabalho.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 são apresentados os objetivos do presente trabalho. No capítulo 2, os conceitos utilizados para a realização do trabalho são apresentados na forma de revisão bibliográfica. No capítulo 3 é apresentada a metodologia. Nos capítulos 4 e 5, respectivamente, são apresentados os resultados e conclusões do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA VIBRAÇÃO

Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração (RAO, 2009). A corda de um violão, as cordas vocais dos seres vivos, um eixo girando, são alguns exemplos em que a vibração está presente.

Inicialmente, foi realizada pelos primeiros estudiosos a tentativa de modelagem matemática em sistemas naturais de vibração para tentar descrever o comportamento de sistemas físicos. Assim sendo, nos dias atuais, o estudo de vibrações se aplica diretamente na área da engenharia, como por exemplo, em fundações, projeto de máquinas, motores, turbinas, entre outros.

Se não realizado corretamente o processo de manutenção, e também uma análise eficaz em vibração de motores, por exemplo, haverá problemas de desbalanceamento de rotores, o que pode resultar em falhas de projeto e até acidentes em serviço.

Em turbinas, o mau cuidado com a vibração pode resultar em falhas mecânicas muito sérias, levando o componente ao mau funcionamento. Em todas estas situações, o componente submetido à vibração pode vir a falhar pela fadiga em que o material estará sujeito, devido à variação cíclica da tensão atuante.

Cada vibração terá uma frequência, ou seja, quantos ciclos ocorrem por unidade de tempo, e cada componente de uma máquina ou estrutura possui uma frequência natural de vibração. Quando a frequência de excitação externa em um componente coincidir com a frequência natural de vibração do mesmo, acontece um fenômeno chamado ressonância, que pode submeter o componente a grandes deflexões e falha, muitas vezes catastrófica.

#### 2.1.1 Vibração Livre

Se um sistema, após uma perturbação inicial, continuar a vibrar por conta própria, a vibração resultante é conhecida como vibração livre. Nenhuma força externa age sobre o sistema. A oscilação de um pêndulo simples é um exemplo de vibração livre (RAO, 2009).



### 2.1.2 Vibração Forçada

Se um sistema estiver sujeito a uma força externa (muitas vezes, uma força repetitiva), a vibração resultante é conhecida como vibração forçada. A oscilação que surge em máquinas, como motores a diesel, é um exemplo de vibração forçada (RAO, 2009).

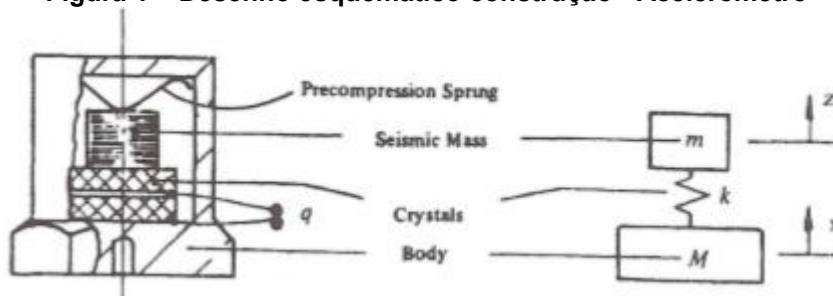
## 2.2 CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES CONVENCIONAIS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO

Aqui são apresentadas algumas características, limitações, vantagens e desvantagens de alguns métodos de sensoriamento de estruturas. Primeiramente os tradicionais e logo em seguida o foco deste trabalho, o método de sensoriamento via fotogrametria. Teste de sensoriamento em estruturas é uma parte importante na análise de vibrações na engenharia, e os resultados obtidos têm uma grande importância. Técnicas de manutenção preditivas e diagnósticas de falha em máquinas baseadas no monitoramento da resposta dinâmica dos componentes já são tradicionais e bem estabelecidas na indústria, devido a sua alta eficácia (GIRDHAR, 2004). A aplicação destes métodos de sensoriamento de vibrações na engenharia é grande, como engenharia civil, aeroespacial, no diagnóstico de turbinas, no setor energético (LIU, TANG, *et al.*, 2015), e vem se expandindo cada vez mais, conforme a necessidade e exigência de cada vez menores porcentagens de falhas ocorrerem e menor tempo em manutenção, ou seja, fora de operação.

Tradicionalmente, a aquisição de dados em análise experimental de vibrações é feita com sensores montados sobre a estrutura ou máquina, como acelerômetros, extensômetros e LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*) (BAQERSAD, POOZESH, *et al.*, 2011) tendo o acelerômetro como o mais comum entre os sensores.

Como premissa, a aceleração do ponto da estrutura ao qual o acelerômetro está montado é medida pela tensão elétrica gerada por um cristal piezelétrico, do qual gera a mesma quando submetido a esforços mecânicos, que sofre uma deformação proporcional à força inercial de uma massa sísmica, esta diretamente relacionada à aceleração sofrida pelo ponto medido (VOLFF, 2017). O desenho esquemático de sua construção é representado pela Figura 1.

**Figura 1 – Desenho esquemático construção - Acelerômetro**



Fonte: Ewins (2000)

Apesar de preciso, a instalação de acelerômetros na estrutura a ser estudada pode interferir em sua rigidez, devido a mais um peso acoplado na mesma. Como a maioria dos acelerômetros são fabricados com fios para a realização de sua transmissão de dados, estes fios podem interferir no movimento do componente a ser examinado e também dificultar a instalação e manuseio do processo. Se for de interesse a medição em vários pontos da estrutura ao mesmo tempo com o uso deste tipo de sensor, serão necessários vários acelerômetros, já que estes são limitados a medir um ponto por vez e, portanto a instalação no componente pode ser demorada e complicada dependendo da estrutura e do local. Além disso, como estarão em contato direto com o componente e, portanto submetidos aos mesmos esforços e dinâmica, os acelerômetros podem ter sua durabilidade e também sua eficiência afetadas.

Se for optado pelo uso de sensores ópticos, ou seja, através da propagação da luz, os problemas dos acelerômetros poderão ser contornados. Com esta ideia de funcionamento, o instrumento mais comum é o Vibrômetro Doppler a Laser (*Laser Doppler Vibrometer – LDV*), porém este contém outras interferências e particularidades, como a limitação em medir apenas pontos discretos da estrutura, o que pode submeter a um alto tempo total de medição. Além do mais, o custo desta tecnologia e de algumas variações dela desenvolvidas ainda é relativamente alto quando comparado as tradicionais. Além disso, para medições de longa duração, a exposição à radiação emitida pelos equipamentos constitui um risco à saúde humana (KOHUT, HOLAK, *et al.*, 2013).

Outras tecnologias que utilizam *laser* para realizar o procedimento de medição de vibração são baseadas em interferometria, como *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI), que é baseado nos fenômenos ópticos de interferência.

Com estes problemas e particularidades apresentados pelos métodos mais tradicionais e comuns de medição de vibração em estruturas, a necessidade de uma solução de certa forma diferente é posta em prova pelos estudiosos e pesquisadores, juntamente com o avanço da tecnologia das câmeras digitais, a qual é a ideia central deste trabalho, a comprovação de que o método baseado na captura e processamento de imagens digitais funciona e traz resultados semelhantes aos acelerômetros, com um percentual aceitável de erro e incerteza. Esta tecnologia é também conhecida como fotogrametria digital, videogrametria, *computer-vision*, entre outros.

Em muitos casos é possível realizar o processo com uma câmera simples, porém os resultados podem ter uma faixa maior de erro, mas dentro do aceitável, do que com câmeras de mais alta tecnologia, devido a resolução da câmera e a taxa de amostragem (quantos frames por segundo, FPS). Na maioria dos casos os requisitos para realizar o processo de forma eficaz é atendido por câmeras comuns de uso doméstico (CHEN, WEN-HWA, *et al.*, 2015).

Na Tabela 1 é apresentado um quadro comparativo de métodos usados atualmente para medição de vibração e sensoriamento em estruturas.

**Tabela 1 - Quadro comparativo de métodos de sensoriamento de estruturas**

<b>Sensores Pontuais de Contato (Acelerômetros, Extensômetros, LVDT's)</b>	<b>Técnicas de Interferometria (ESPI, DSS)</b>	<b>LDV (Laser Doppler Vibrometer)</b>	<b>Fotogrametria</b>
Necessita fixação e pode induzir o carregamento em massa ou mudança rigidez	Não usa contato	Não usa contato	Não usa contato
Fácil obtenção das funções de transferência	Necessita pós-processamento para obtenção das funções	Fácil obtenção das funções de transferência	Necessita pós-processamento para obter as funções
Obtenção de dados somente a respeito dos pontos medidos	Dados sobre toda uma superfície do objeto	Dados disponíveis em ponto pré-definido	Dados disponíveis sob toda uma superfície do objeto
A sensibilidade de cada ponto depende do transdutor	Sensibilidade diminui à medida que aumenta o campo de visão	Sensibilidade relacionada com o comprimento de onda do laser	Sensibilidade diminui com aumento do campo de visão
Ampla faixa de frequência	Melhor para baixas frequências	Maior faixa de frequência	Melhor desempenho para baixas frequências
Não possui sensibilidade a movimentos de corpo rígido	Calibração muito sensível as condições de operação	Calibração altamente sensível às condições e movimentos	Calibração menos sensível as condições operacionais
Custo baixo	Custo muito alto	Custo muito alto	Custo alto
Baixa resolução espacial	Alta resolução espacial	Alta resolução espacial	Alta resolução espacial
Devido a problemas de sensibilidade, é muito difícil extrair ambos os modos de corpo rígido e flexíveis utilizando um tipo de transdutor	Difícil extração de movimentos de corpo rígido	Difícil extração de movimentos de corpo rígido	Fácil extração de movimentos de corpo rígido
Medições rápidas	Medições muito rápidas	Medições demoradas	Medições não demoradas
Processamento de dados muito rápido	Processamento de dados rápido	Processamento de dados rápido	Tempo de processamento depende
Permite processamento on-line	Não aplicado a estruturas altamente flexíveis	Não aplicado a estruturas altamente flexíveis	Apropriado a estruturas altamente flexíveis
Depende do tipo de sensor, apenas mede deslocamento, aceleração ou deformação	Mede deslocamento e deformação	Mede velocidade, com equipamento extra pode medir deformação	Mede deslocamento e deformação (DIC)
Difícil uso em partes rotativas devido à fixação	Aplicável em partes rotativas	Difícil uso em partes rotativas devido à fixação	Apropriado para partes rotativas

**Fonte: Baqersad et al. (2011)**

De modo geral, as técnicas fotogramétricas se dividem nas seguintes categorias:

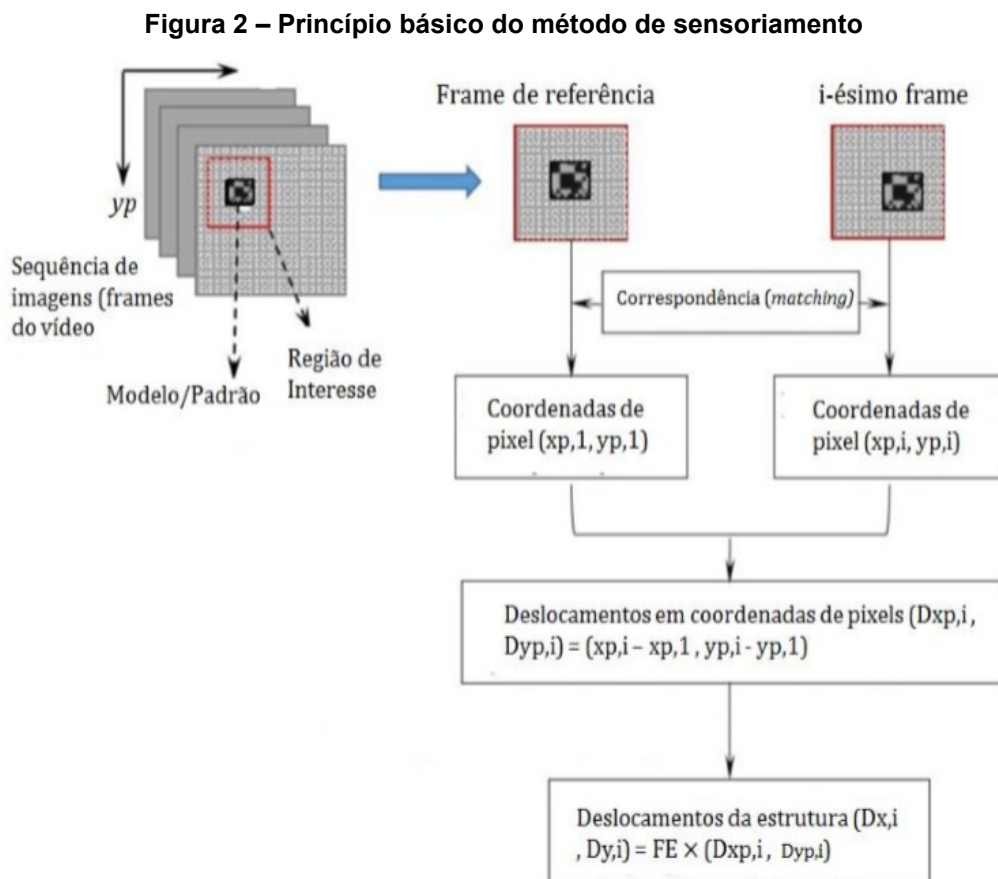
- Rastreamento de pontos, em inglês *Point Tracking (PT)*, da qual utiliza as câmeras fotográficas para identificar coordenadas de pontos discretos montados na estrutura teste, ou seja, uma série de alvos ópticos são montados e os centros dos alvos são encontrados usando um algoritmo (BAQERSAD, POOZESH, *et al.*, 2011);
- Correlação de imagem digital (DIC), em inglês *Digital Image Correlation*, baseia-se na variação em escalas de cinzas de padrões contínuos (BAQERSAD, POOZESH, *et al.*, 2011);
- Abordagem sem trajeto, em inglês *Target-less approaches*, a qual não utiliza alvos ópticos ou padrões para encontrar a deformação da estrutura, mas utiliza características internas ou arestas da mesma para identificar pontos ou áreas que devem ser examinados (BAQERSAD, POOZESH, *et al.*, 2011);
- O método de jogo padrão e correlação cruzada analítica também são técnicas utilizadas em análise de dinâmica estrutural.

### 2.3 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO POR IMAGEM: ANÁLISE VIA FOTOGRAMETRIA

Nesta seção é apresentada a técnica fotogramétrica utilizada para fazer a o monitoramento de vibrações. Os fundamentos de captação e processamento das imagens, cujo resultado final é um sinal de deslocamento do sistema em estudo são demonstrados. O método escolhido para este trabalho foi o DIC. A simulação computacional aproximada como o método dos Elementos Finitos (FE) pode fornecer resultados completos sobre uma estrutura inteira (BAQERSAD, POOZESH, *et al.*, 2011). O sistema que compõe a captação, processamento e extração do sinal de deslocamento das imagens é chamado Sistema de Sensoriamento via Fotogrametria Digital (SSFD).

O método citado resume-se basicamente em uma série de imagens registradas por uma câmera (via gravação de um vídeo, cada imagem sendo um dos respectivos frames). O primeiro frame serve como imagem de referência, com quais os frames subsequentes são comparados via critério de correspondência. A

distância entre o padrão analisado na imagem de referência e no frame é computado em pixel e então multiplicado por um fator de escala (com dimensão pixels/mm), de modo a obter-se o deslocamento da estrutura (VOLFF, 2017). Como o foco principal do trabalho é o desenvolvimento do código em si, o fator de escala não foi utilizado, e a conversão foi ajustada por um fator dado pela razão dos valores eficazes (rms) dos sistemas. Na Figura 2 é ilustrado o princípio básico do método.

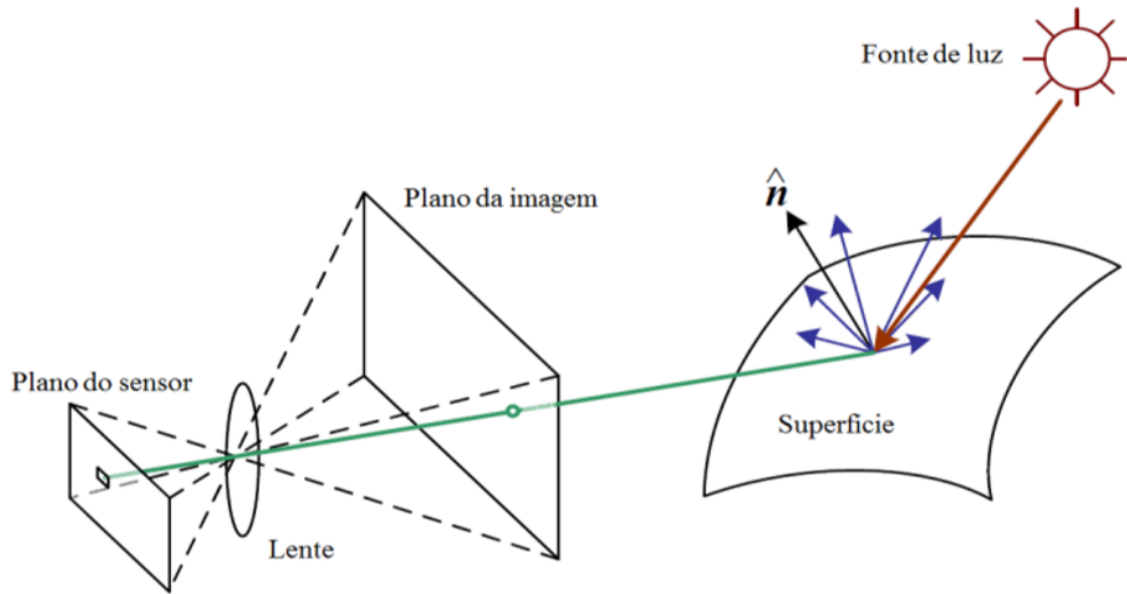


Fonte: adaptado de Feng (2016)

### 2.3.1 Formação da Imagem

A formação da imagem é o primeiro passo para se chegar a informação pretendida pela análise. Para isso, uma fonte luminosa deve irradiar sobre a superfície da estrutura em análise e refletir em direção a câmera, conforme é mostrado na Figura 3. No caso de uma câmera digital, os fótons de luz atravessam a lente da câmera e a imagem é formada no plano do sensor (VOLFF, 2017).

Figura 3 – Formação da imagem



Fonte: Szeliski (2010)

Matematicamente, o processo de formação da imagem digital é descrito como uma transformação geométrica, em que pontos no espaço do objeto (sistema de coordenadas do mundo) são mapeados para um novo sistema de coordenadas (o sistema de coordenadas da imagem digital) (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008). Seja  $\mathbf{P} = [X Y Z 1]^T$  um ponto no espaço do objeto (o último elemento com valor igual a 1 é chamado coordenada homogênea, e é adicionado de modo que as transformações possam ser expressas como multiplicações de matrizes), e o ponto  $\mathbf{p} = [x y 1]^T$  seu correspondente no plano de imagem (em pixels), então ambos se relacionam através da Equação (1).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f s_x & \tan(\theta) & x_c & 0 \\ 0 & f s_y & y_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

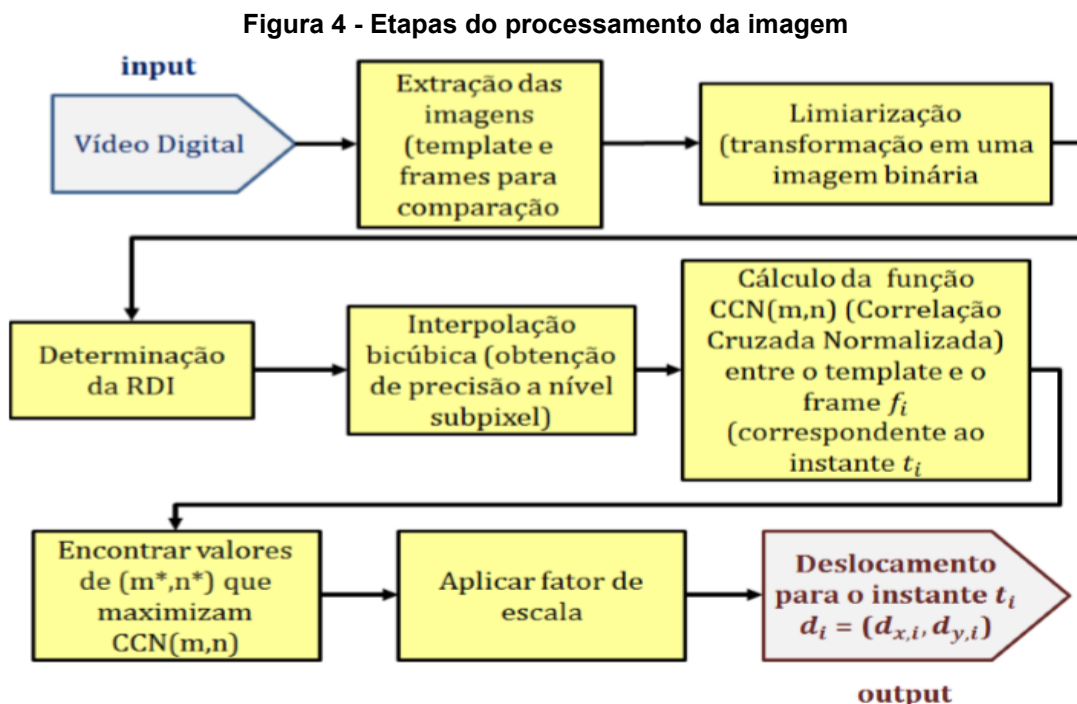
O produto dessa transformação é uma imagem digital, cujo modelo é dado pela função  $f(x,y)$ , como mostra a Equação (2). Cada elemento da matriz  $\mathbf{f}(x,y) = \mathbf{A} = \mathbf{M} \times \mathbf{N}$  representa o valor de um pixel na posição  $(x,y)$  no sistema de coordenadas da imagem digital, que para imagens na escala de cinza representa um nível de intensidade de luz (VOLFF, 2017).

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(1,0) & \dots & f(M-1,0) \\ f(0,1) & f(1,1) & \dots & f(M-1,1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(0,N-1) & f(1,N-1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.3.2 Processamento da Imagem

O método citado se baseia no uso de imagens digitais para a obtenção da função deslocamento correspondente de um ponto pré-determinado em uma estrutura que vibra. Portanto, a estrutura em movimento é filmada e cada frame do vídeo, ou seja, cada imagem da qual o vídeo é composto, é comparado com uma imagem de referência e destas comparações é possível encontrar os deslocamentos da estrutura. O método utilizado para realização deste trabalho, o DIC, usa a correlação cruzada entre o frame  $f_i$  e a imagem de referência  $w$  para calcular o deslocamento. Quando denominada esta técnica, a mesma permite fazer uma análise ODS (*Operating Deflection Shape*), com algumas limitações, como a frequência das câmeras atuais.

Na Figura 4 são ilustradas as etapas do processamento da imagem para a obtenção do deslocamento. Cada etapa será explanada na sequência.



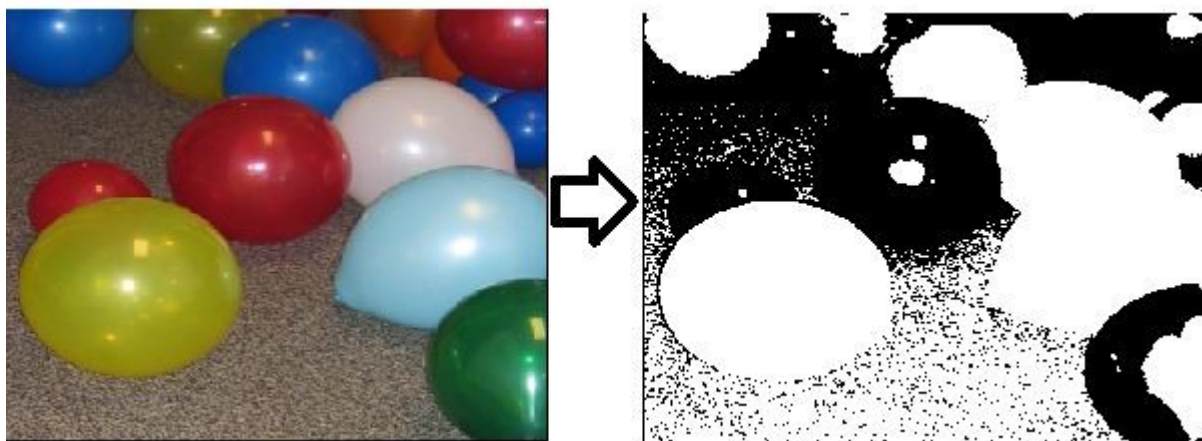
Fonte: Volff (2017)



### 2.3.2.1 Limiarização

Para que seja possível calcular a função de correlação cruzada, cada elemento das matrizes que representa a imagem de referência e o frame deve ser um número real. Inicialmente, as imagens de saída do vídeo estão no formato *Red Green Blue* (RGB), de modo que cada pixel, ou seja cada elemento da matriz, é representado por um vetor com três valores que representam os níveis de vermelho, verde e azul do pixel (VOLFF, 2017). Através do processo chamado limiarização, em inglês *thresholding*, é possível converter as imagens para uma escala de cinza, onde cada pixel possui um valor que varia entre  $v_{\min}$ , que representa completamente preto, e  $v_{\max}$ , o qual representa completamente branco. Para economia de trabalho computacional, é comum utilizar apenas dois níveis:  $f(x,y) = 0$  sendo preto e, portanto os pixels de baixa intensidade limiar, e  $f(x,y) = 1$  sendo branco, os de alta intensidade limiar. Utilizou-se as funções *rgb2gray* e também *im2bw* do Scilab para realizar essa transformação. Na Figura 5 é ilustrado um exemplo do processo.

Figura 5 - Exemplo do processo de limiarização



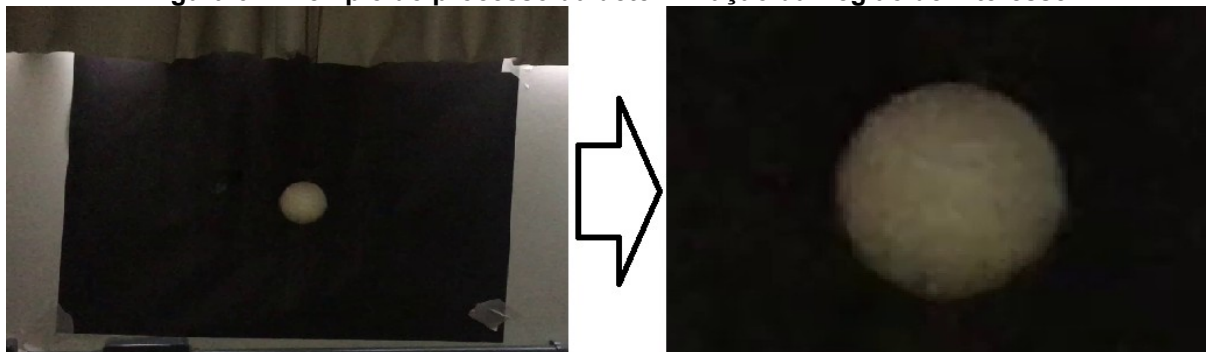
Fonte: Scilab

### 2.3.2.2 Determinação da Região de Interesse

Com o intuito de reduzir o tempo computacional, denomina-se uma região específica nas imagens, a chamada Região de Interesse (RDI), para que seja possível a obtenção de resultados de maior precisão quando aplicado o método. O mesmo é realizado através de uma função no software utilizado, o Scilab, chamada

*imcrop*, do qual realiza um recorte na imagem original conforme coordenadas em pixels indicadas pelo usuário. Na Figura 6 é ilustrado um exemplo.

**Figura 6 - Exemplo do processo da determinação da Região de Interesse**



Fonte: autoria própria

### 2.3.2.3 Interpolação entre pixels

Os valores possíveis de deslocamento obtidos através da função Correlação Cruzada Normalizada,  $m^*$  e  $n^*$  terão necessariamente uma precisão à nível de pixels, esta sendo grandemente influenciada pela resolução da câmera usada (VOLFF, 2017). Uma das opções para melhorar a precisão de medição do deslocamento é interpolar os valores de pixels, conseguindo uma precisão em subpixel. A função bicúbica melhor indicada, é definida pela Equação (3).

$$f(x', y') = \sum_{u=-1}^2 \sum_{v=-1}^2 f(x + u, y + v) R(u - dx) R(dy - v) \quad (3)$$

Esta função não causa problemas de bordas serrilhadas, borramento e preserva detalhes finos da imagem (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008).

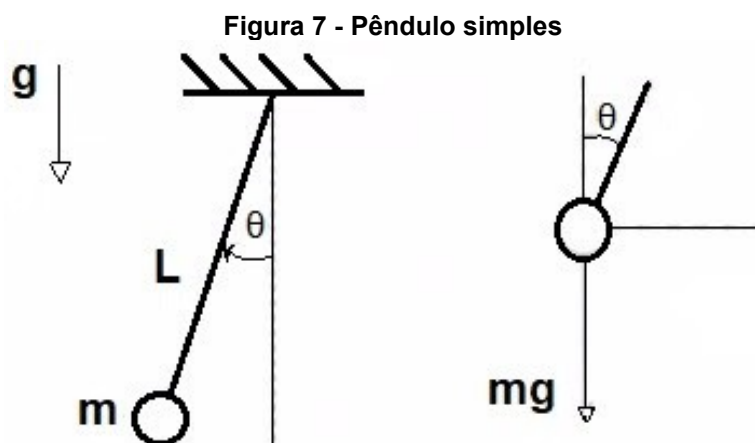
### 2.3.2.4. Cálculo do deslocamento via função de Correlação Cruzada Normalizada

A função de Correlação Cruzada Normalizada (CCN) é uma medida de similaridade entre entidades em uma imagem e suas entidades correspondentes na outra imagem (DEBELLA-GILO e KÄÄB, 2011). No caso, as entidades são os padrões, como o círculo mostrado na Figura 6, e a função CCN é calculada

comparando a imagem de referência, no caso o sistema mecânico na posição de equilíbrio estático  $w$ , e os frames do vídeo  $f_i$ .

## 2.4 O PÊNDULO SIMPLES

O número mínimo de coordenadas independentes requeridas para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema a qualquer instante define o grau de liberdade do sistema (RAO, 2009). O pêndulo simples mostrado na Figura 7 representa um sistema com apenas um grau de liberdade.



Fonte: adaptado de Sotelo Jr. e França (2006)

O movimento do pêndulo simples pode ser definido em termos do ângulo  $\theta$  (RAO, 2009). Este movimento pode ser descrito por uma função seno, a qual prediz o tempo necessário para o movimento se repetir, e deve descrever o mais próximo possível o comportamento do sistema.

Supondo vibração livre, que a barra de comprimento  $L$  possua uma massa desprezível e que não há dissipação de energia no sistema, aplica-se a segunda lei de Newton para translação e rotação nesse sistema, do qual se chega a equação diferencial ordinária (EDO) demonstrada pela Equação (4).

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{g}{L}\right) * \text{sen}(\theta) = 0 \quad (4)$$

Considerando  $\theta \ll 1$ ,  $\text{sen}(\theta) \cong \theta$ . Portanto substituindo na Equação (4) e resolvendo a EDO, chega-se a conclusão que a frequência natural do pêndulo ( $f$ ) dada em Hertz, é dada pela Equação (5):

$$f = \sqrt{\frac{g}{L}} * \frac{1}{2*\pi} \quad (5)$$

## 2.5 APLICAÇÕES PRÁTICAS DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRIA EM DINÂMICA ESTRUTURAL

A análise de dinâmica estrutural vem se desenvolvendo nas suas variadas formas de procedimento nos últimos anos, já que cada vez mais se busca uma prevenção de falhas de componentes efetiva e, conseqüentemente evitar ao máximo que os mesmos permaneçam fora de operação. Em seguida são apresentados alguns exemplos de aplicação de técnicas baseadas em imagens digitais na análise de dinâmica estrutural.

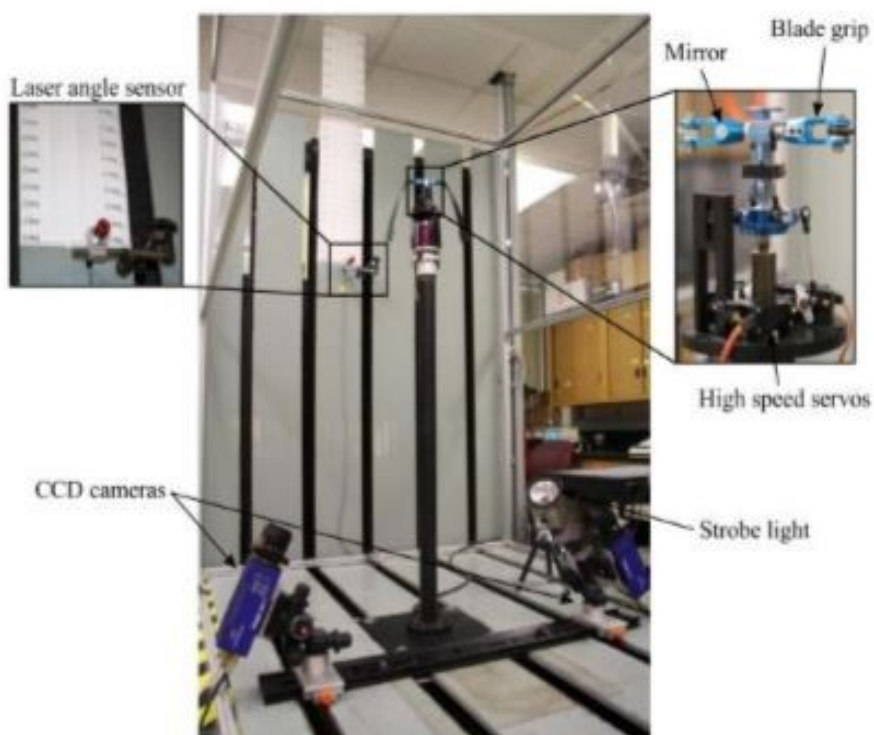
Um exemplo de aplicação desta tecnologia é no monitoramento de integridade estrutural, em inglês *Structural Health Monitoring* (SHM). Patsias e Staszewskiy (2002) usaram um algoritmo de detecção de bordas para se identificar os defeitos em uma viga engastada específica. Feng e Feng (2015) obtiveram frequências naturais e modos normais de vibração de uma estrutura tipo frame usando testes em laboratório e obtiveram boa tendência dos resultados em comparação com sensores de deslocamento a laser e acelerômetros. Os experimentos foram feitos com dois tipos de alvos: quadros de padrão preto e branco de alto contraste e alvos naturais e obtiveram bons resultados em ambos os casos (VOLFF, 2017).

A avaliação de pontes utilizando técnicas de imagens digitais é um importante campo de pesquisa em SHM. Um dos primeiros a tentar usar fotogrametria na inspeção de pontes foi Olaszek (1999). Wahbeh, Caffrey e Masri (2003) tentaram utilizar luzes de LED como alvos. Com uma câmera comercial e lentes telescópicas, Lee e Shinozuka (2006) conseguiram medir certas frequências de movimento de pontes durante tráfico de veículos, com resultados em conformidade com obtidos através de um LDV, mostrando que a técnica é precisa e

de baixo custo (VOLFF, 2017). O'Byrne, Ghosh, *et al.* (2015) compararam resultados no cálculo de frequência de uma ponte quando excitada pela passagem controlada de pedestres, utilizando dados obtidos pelas medições de uma câmera comercial e acelerômetros, e os resultados foram convergentes (VOLFF, 2017).

A fotogrametria tem uma boa aplicabilidade em sistemas com partes rotativas, devido a ausência de fiação e da capacidade destes sistemas captarem movimentos de corpo rígido e movimento fora do plano de rotação (VOLFF, 2017). Com o uso de uma lâmpada estroboscópica e um sistema com duas câmeras, Helfrickn, Niezrecki e Avitabile (2009) monitoraram a viração em pás de um ventilador em múltiplos pontos simultaneamente. Sicard e Sirohi (2013) utilizaram uma técnica parecida para rotores de alta flexibilidade. Na Figura 8 é representado o esquema montado pelos mesmos.

**Figura 8 - Estudo de rotação de pás altamente flexíveis**



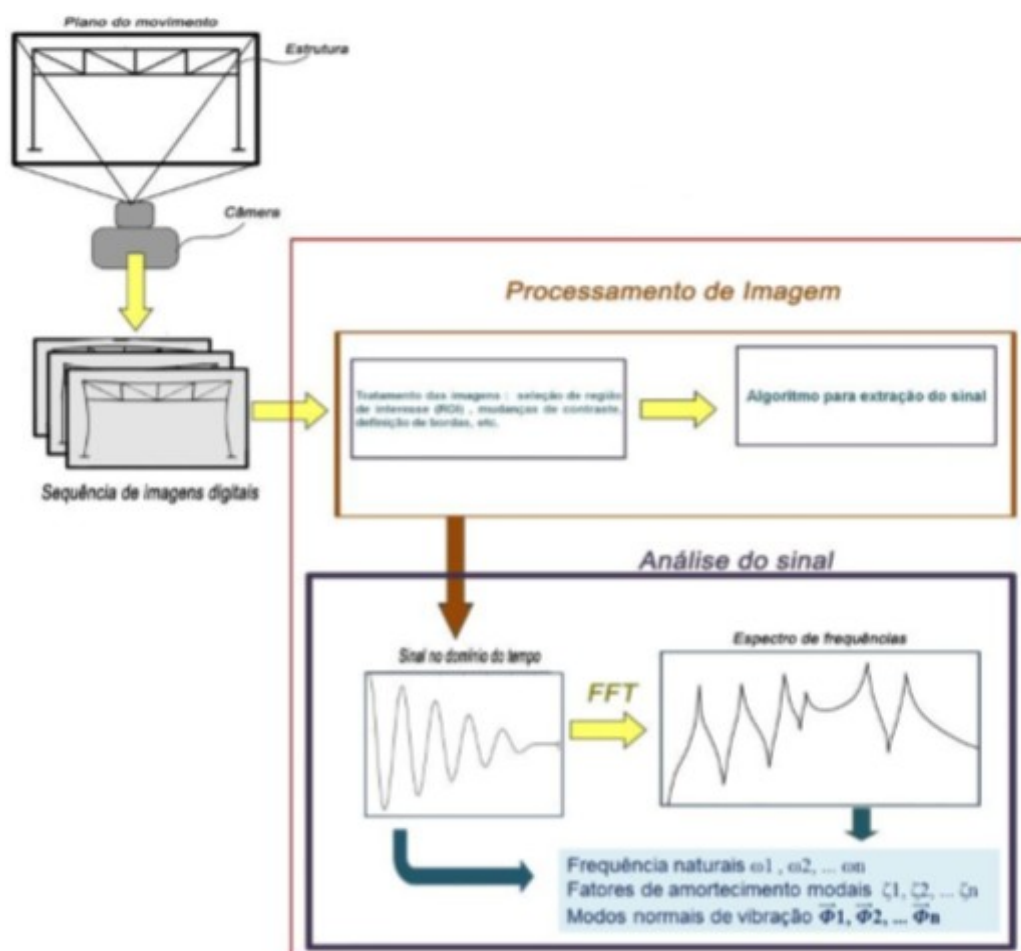
Fonte: Sicard e Sirohi (2013)

### 3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

#### 3.1 PROCESSO COMPUTACIONAL

Na Figura 9 é demonstrado um esquema do procedimento adotado para o processamento dos dados coletados nos experimentos propostos, assim como a comprovação do método.

Figura 9 - Esquema generalizado do sistema proposto



Fonte: adaptado de Volff (2017)

Como se pode observar, faz-se necessário realizar um processamento de imagem, e este foi feito pelo programa livre Scilab.

### 3.2 SISTEMAS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Para a realização do primeiro experimento proposto, um pêndulo simples foi montado no Laboratório de Vibrações e Mecanismos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, com um fio preto e uma bola de sinuca branca na ponta. O fio preto formou um elo tipo “V” com a bola, conforme é mostrado na Figura 10 para garantir que a bola se movimentasse apenas lateralmente, evitando movimento frontal.

**Figura 10 - Vista lateral do pêndulo**

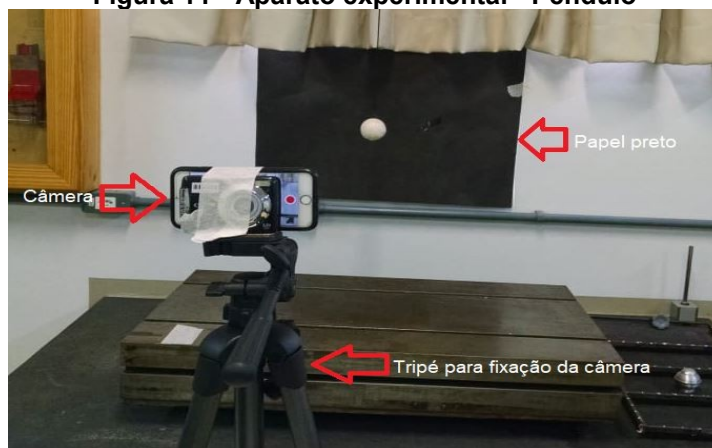


**Fonte: autoria própria**

Como a frequência natural do pêndulo depende apenas da aceleração da gravidade  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  e do comprimento conhecido  $L = 1,75 \text{ m}$  do mesmo, conforme mostra a Equação (5), a massa da bola não foi medida. Foram realizadas medições em 3 distâncias  $\Delta x$  diferentes entre o alvo (bola de sinuca) e a câmera digital (celular), sendo elas 60 cm, 1 m e 1,5 m, com o pêndulo excitado manualmente. Para cada distância foram feitas duas excitações manuais diferentes, a primeira com o ângulo  $\theta$  muito pequeno, e a segunda com o ângulo  $\theta$  maior, ou seja, com maior oscilação. Para cada caso, um vídeo de aproximadamente 45 segundos foi gravado pela câmera de um celular. Todos os vídeos foram gravados com apenas o flash da câmera do celular ligado e, portanto com todas as luzes apagadas, para melhor captura e nitidez do alvo. Para todos os casos, esperava-se uma frequência natural ( $f$ ) de aproximadamente 0,38 Hz.

Como pode ser visto na Figura 11, aos fundos do plano de movimento foi colocado um papel preto para que apenas os movimentos do alvo (bola de sinuca) fossem identificados quando feita a limiarização da imagem.

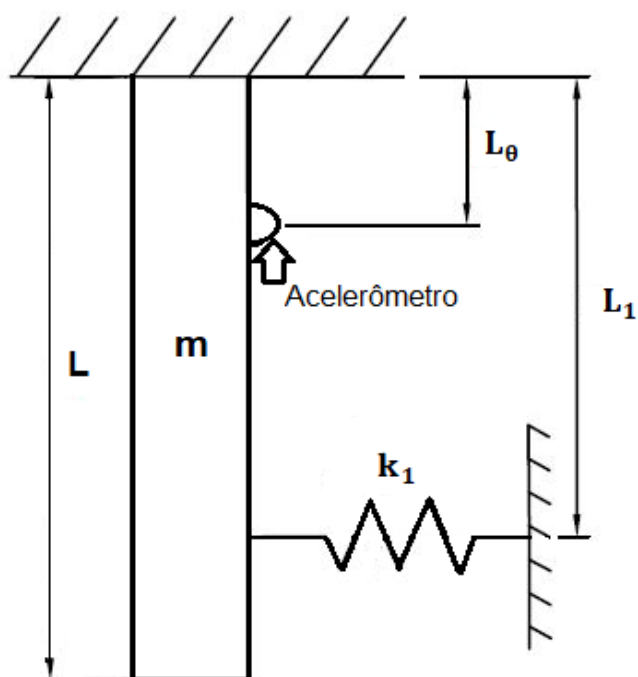
Figura 11 - Aparato experimental - Pêndulo



Fonte: autoria própria

Para a realização do segundo experimento proposto, uma barra rígida de comprimento  $L = 400 \text{ mm}$ , massa  $m = 1,693 \text{ kg}$ , foi colocada na vertical conforme é mostrado o esquema na Figura 12, pinada em uma das pontas, com uma mola de rigidez conhecida  $k_1 = 309,25 \text{ N/m}$  a uma distância  $L_1 = 343 \text{ mm}$  da ponta superior e um acelerômetro a uma distância  $L_\theta = 160 \text{ mm}$  da ponta superior.

Figura 12 - Desenho esquemático do sistema



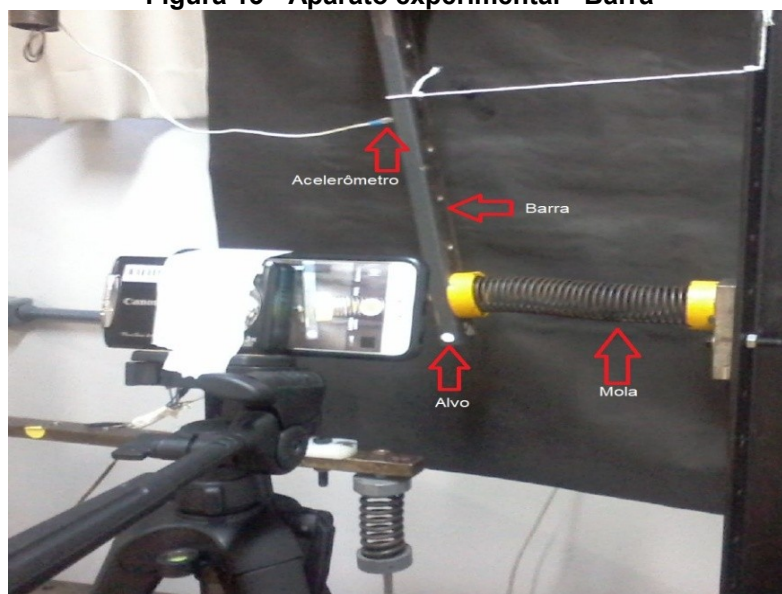
Fonte: autoria própria



O sistema foi colocado em movimento com excitação manual, monitorado com o acelerômetro e filmado ao mesmo tempo em duas situações: primeiro com as luzes do laboratório ligadas e, portanto sem o uso do flash na câmera, e segundo com o flash da câmera ligado, portanto com as luzes todas apagadas. Para cada situação um vídeo de aproximadamente 25 segundos foi gravado. Em ambos os casos a distância entre a barra e a câmera digital foi de 50 cm.

Como pode ser visto na Figura 13, um alvo foi demarcado a uma distância  $L_0 = 382 \text{ mm}$  da ponta superior da barra para a monitoria do movimento, e também como no caso anterior, aos fundos do plano de movimento foi colocado o mesmo papel preto para que apenas os movimentos do alvo fossem identificados.

**Figura 13 - Aparato experimental - Barra**



**Fonte: autoria própria**

Depois de realizados os experimentos, foi desenvolvido um modelo teórico para o segundo experimento, conforme esquema demonstrado pela Figura 12. Considerando o movimento da barra em vibração livre e que não há dissipação de energia no sistema, aplicou-se a lei de Newton para translação e rotação, do qual se chegou à EDO demonstrada pela Equação (6).

$$I_0 * \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left( (k_1 * L_1^2) + \left( m * g * \frac{L}{2} \right) \right) * \theta = 0 \quad (6)$$

Onde  $I_0$  é o momento de inércia da barra, que se dá pela Equação (7).

$$I_0 = \frac{m * L^2}{3} \quad (7)$$

Supondo uma solução para a EDO do tipo  $\theta(t) = \theta * \cos(w * t - \varphi)$ , derivando e substituindo na Equação (6), chega-se a conclusão que a frequência natural da barra ( $f$ ) dada em Hertz, é dada pela Equação (8).

$$f = \sqrt{\frac{(k_1 * L_1^2) + (m * g * \frac{L}{2})}{I_0}} * \frac{1}{2 * \pi} \quad (8)$$

Portanto, substituindo os valores definidos anteriormente na Equação (8), esperava-se uma frequência natural ( $f$ ) de aproximadamente 3,34 Hz.

Utilizando as condições de contorno: aceleração inicial ( $a_0$ ) dada pelos resultados do acelerômetro em um ponto demarcado na curva e colocando o sistema partindo do repouso, ou seja velocidade inicial ( $v_0$ ) igual a zero, obtemos as constantes da resposta teórica. Conclui-se que com estas condições, o ângulo  $\varphi$  tem valor zero, e a constante  $\theta$  fica denominada pela Equação (9).

$$\theta = -\frac{a_0}{w^2} \quad (9)$$

Onde  $w$  é o valor da frequência natural dado em rad/s, ou seja:  $w = 2 * \pi * f$ . Portanto, substituindo o valor das constantes, a solução do sistema fica denotada pela Equação (10).

$$\theta(t) = -\frac{a_0}{w^2} * \cos(w * t) \quad (10)$$

Esta equação representa o movimento de  $\theta$  em qualquer ponto da barra. Como nosso objetivo é a análise do deslocamento no alvo, para assim compararmos com a análise no alvo da fotogrametria pelo Scilab, multiplicamos a Equação (10) pela distância  $L_0$  já definida para que o movimento de deslocamento da barra seja descrito no local de interesse da análise.

O valor detectado de frequência natural pelo acelerômetro foi ( $f = 3,005 \text{ Hz}$ ), portanto o valor de  $w$  utilizado ficou ( $w = 18,88 \text{ rad/s}$ ) para ambos os casos.

Para o primeiro caso, ou seja sem o uso do flash na medição, o valor da aceleração detectado pelo acelerômetro em certo ponto da curva escolhido foi ( $a_0 = 4,08 \text{ m/s}^2$ ). Substituindo esse valor direto na Equação (10) juntamente com o valor de  $w$ , chegamos na Equação (11), que descreve o deslocamento do alvo em milímetros para este caso.

$$\theta(t) = -27,33 * \cos(18,88 * t) \quad (11)$$

Como o deslocamento detectado pelo método da fotogrametria digital nos dá um resultado em pixels, foi necessário realizar um ajuste para que ambas ficassem na mesma unidade. Para isso, foi calculado a raiz do valor quadrático médio, ou valor eficaz, de ambas as curvas, realizado uma razão entre eles e então esse valor final foi multiplicado na curva experimental via fotogrametria, para que então ambos estivessem na mesma dimensão.

Após este passo, uma Transformada Rápida de Fourier, em inglês *Fast Fourier Transform* (FFT), foi aplicada em ambas as curvas, teórica e experimental, para assim ser possível detectar a frequência natural do sistema.

Para o segundo caso, ou seja com o uso do flash na medição, o valor da aceleração detectado pelo acelerômetro em certo ponto da curva escolhido foi ( $a_0 = 6,66 \text{ m/s}^2$ ), um pouco maior que o primeiro caso devido a excitação inicial ter sido maior. Seguindo os mesmos passos do primeiro caso, chega-se a Equação (12) que demonstra o deslocamento do alvo para este caso.

$$\theta(t) = -44,60 * \cos(18,88 * t) \quad (12)$$

Repetiu-se o mesmo procedimento do primeiro caso para que fosse possível a comparação nas mesmas dimensões.

### 3.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento utilizado para ambos os experimentos consiste em um celular com câmera digital para captação da imagem, o celular usado foi um iPhone modelo MKQM2BZ/A, com gravação a 30 frames por segundo (fps), e resolução de 1920 x 1080 pixels. É importante ressaltar que as frequências fundamentais, ou seja a mais baixa e mais forte frequência, do pêndulo e da estrutura analisada devem estar abaixo de 10 Hz. Isso porque, uma vez que a câmera só é capaz de gravar a 30 fps, ou seja, 30 medições por segundo ou 30 Hz. Pelo Critério de Nyquist, a frequência de vibração do sistema monitorado deve ser menor que metade deste valor, ou seja 15 Hz (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008). Entretanto, valores que atendem este critério, mas ainda estão próximos do valor limite não são desejados por fornecerem sinais de baixa resolução (VOLFF, 2017).

Para o desenvolvimento do código computacional e, portanto, processamento das imagens foi utilizado um notebook HP, memória RAM instalada 8,00 GB, processador AMD A10-5745M APU com Radeon(tm) HD Graphics de 2.10 GHz. O software livre Scilab e um acelerômetro para comparação dos resultados.

Também foi utilizado uma bola de sinuca branca, fio preto, papel preto, tripé para fixação do celular, tesoura, fita branca, trena, uma barra rígida posicionada na vertical, pinada em uma das pontas e com uma mola de rigidez conhecida acoplada.

Os equipamentos utilizados, com exceção do celular e do notebook, encontravam-se todos disponíveis no Laboratório de Vibrações e Mecanismos da UTFPR – Campus Pato Branco.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS PRIMEIRO EXPERIMENTO

Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 são mostrados os resultados dos sinais no tempo obtidos no primeiro experimento, ou seja do pêndulo simples juntamente com suas respectivas distâncias  $\Delta x$  entre câmera e alvo (bola de sinuca) e a excitação inicial, ou seja o tamanho de  $\theta$ , bem como seus respectivos espectros de frequência. Em todos os gráficos o intervalo de tempo analisado foi de 0 a 20 segundos, e o intervalo da frequência foi de 0 a 1,2 Hz.

Pode-se notar que pelo gráfico do sinal no tempo para pequenas excitações, ilustrado pela Figura 14, o sinal não fica claramente nítido. Isso se deve ao alto nível de ruído causado pela pequena oscilação. O que ocorre é que os frames do vídeo  $f_i$  se deslocam muito pouco, e quando comparados ao frame de referência  $w$  acontece uma sobreposição dos alvos devido ao baixo deslocamento, ou seja a comparação não se torna eficaz e precisa, o que acarreta na má precisão de medida destes casos. Devido a isto, decidiu-se por não realizar excitação com  $\theta$  muito pequenos para os demais casos.

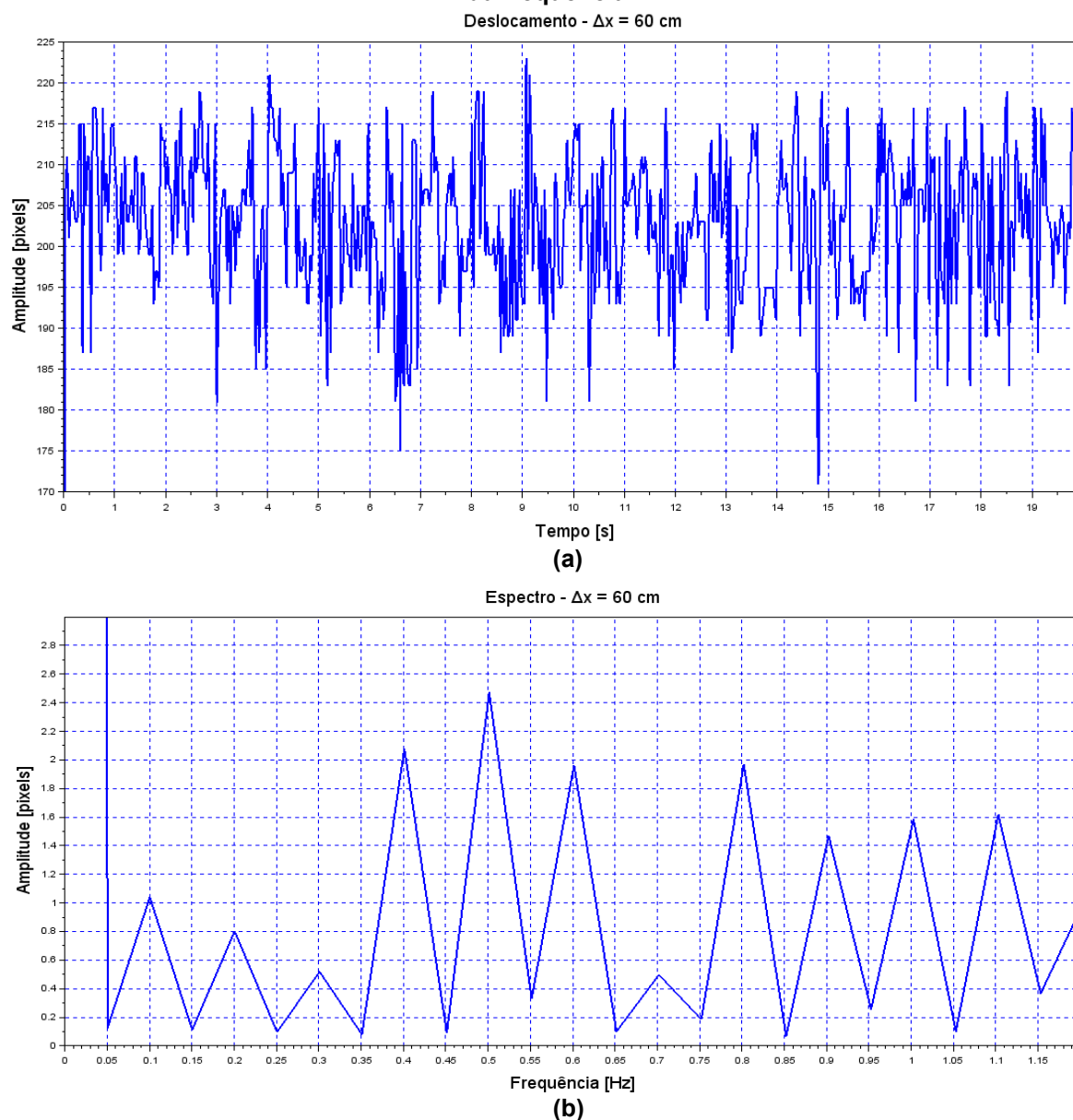
Pelos gráficos do espectro de frequência, nota-se que a frequência natural ( $f$ ) ficou em torno de 0,37 Hz em todos os casos, o que é bem próximo ao calculado analiticamente. Na Tabela 2 é mostrado um quadro comparativo entre os valores de frequência para cada caso, assim como suas respectivas diferenças.

Pode-se notar que nos gráficos da amplitude em função do tempo, a oscilação não se dá em torno de 0 como de costume, isso ocorreu devido a não utilização da função de normalização no código, devido a não disponibilidade da mesma na caixa de ferramentas do programa utilizado.

Tabela 2 - Quadro comparativo dos resultados do primeiro experimento

		$f$ [Hz]	Diferença %
$\Delta x = 60$ cm	Experimental	0,37	2,6
	Teórico	0,38	
$\Delta x = 1$ m	Experimental	0,36	5,3
	Teórico	0,38	
$\Delta x = 1,5$ m	Experimental	0,37	2,6
	Teórico	0,38	

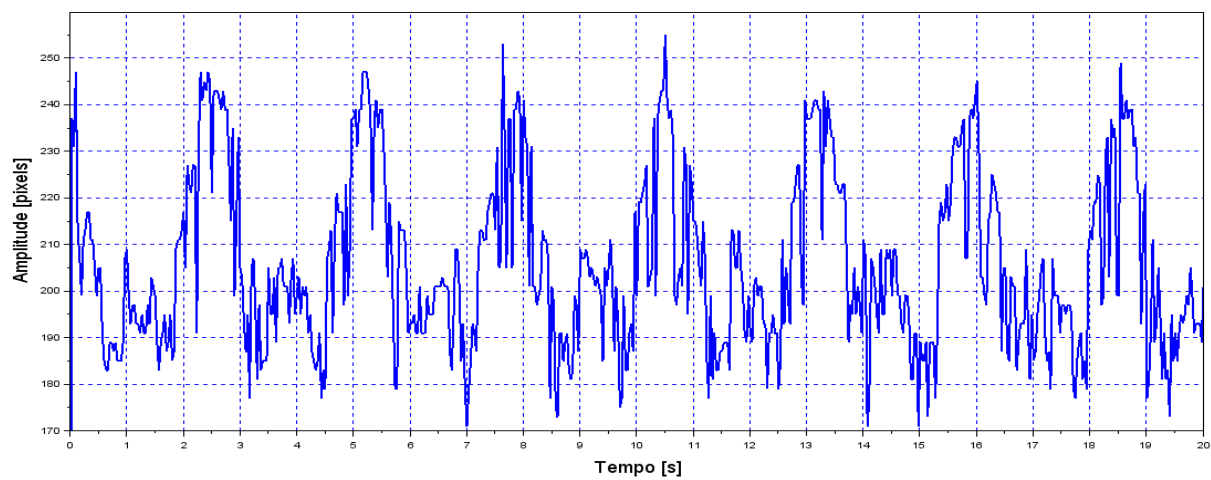
Fonte: autoria própria

Figura 14 - Resultados para  $\theta$  muito pequenos sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência

Fonte: autoria própria

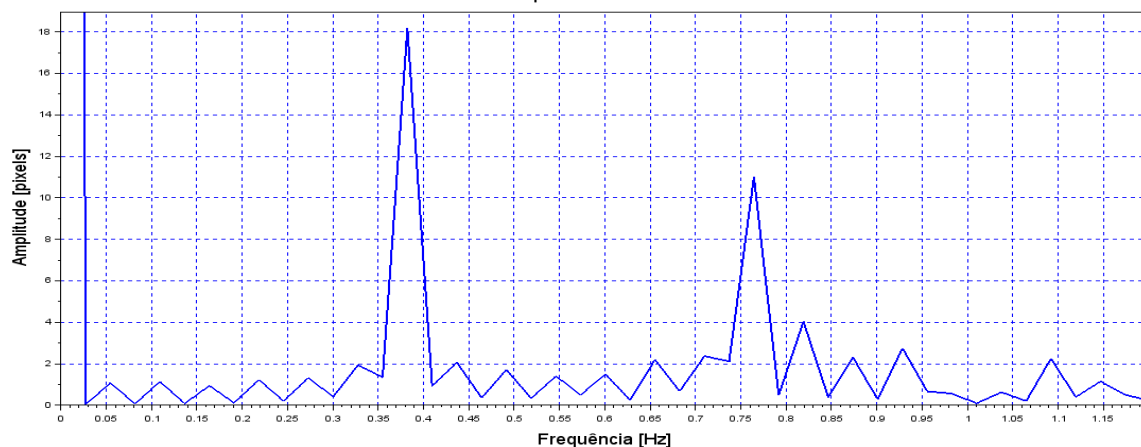
**Figura 15 - Resultados para  $\theta$  maiores sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência**

Deslocamento -  $\Delta x = 60$  cm



(a)

Espectro -  $\Delta x = 60$  cm

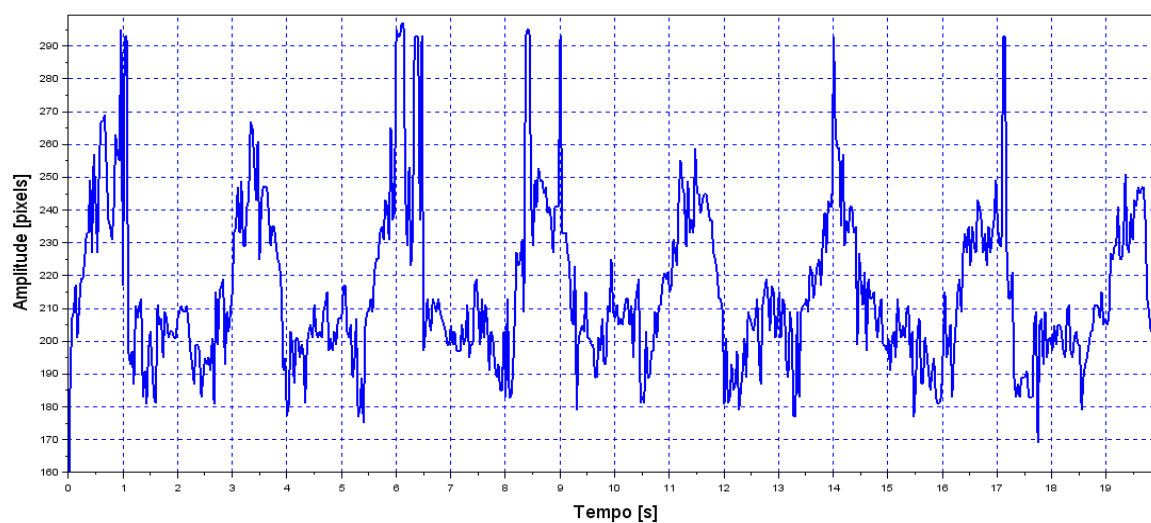


(b)

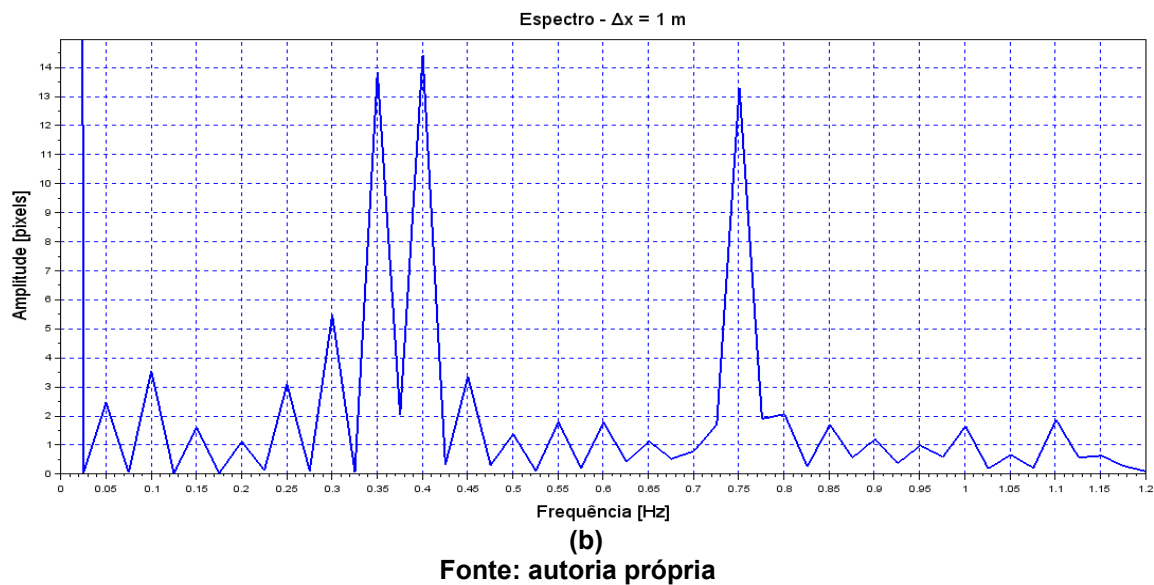
Fonte: autoria própria

**Figura 16 - Resultados para  $\theta$  maiores sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência**

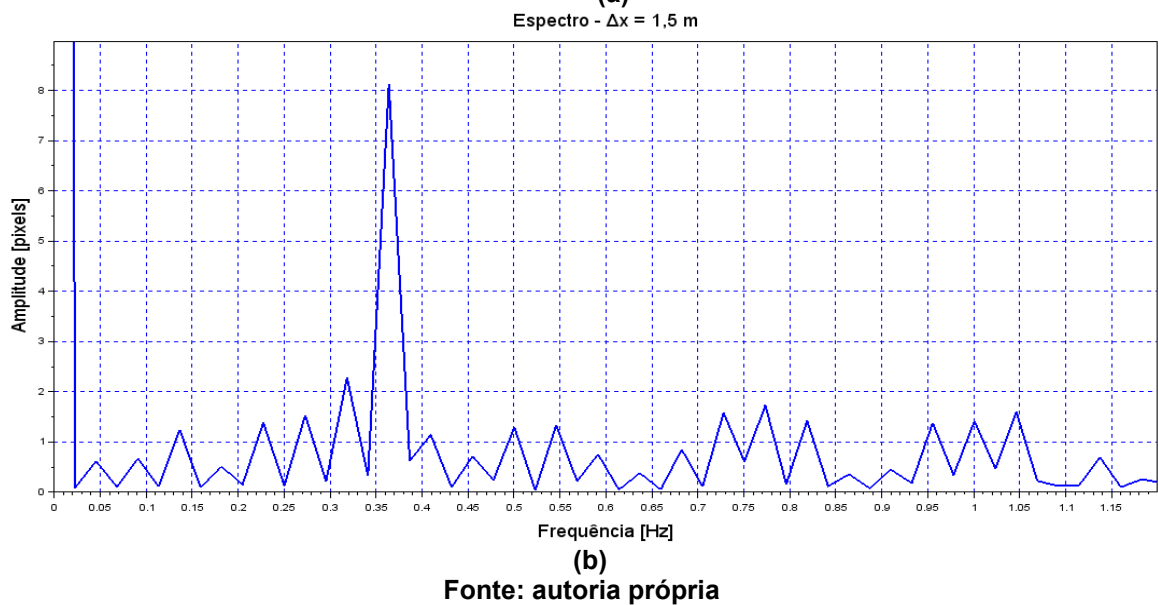
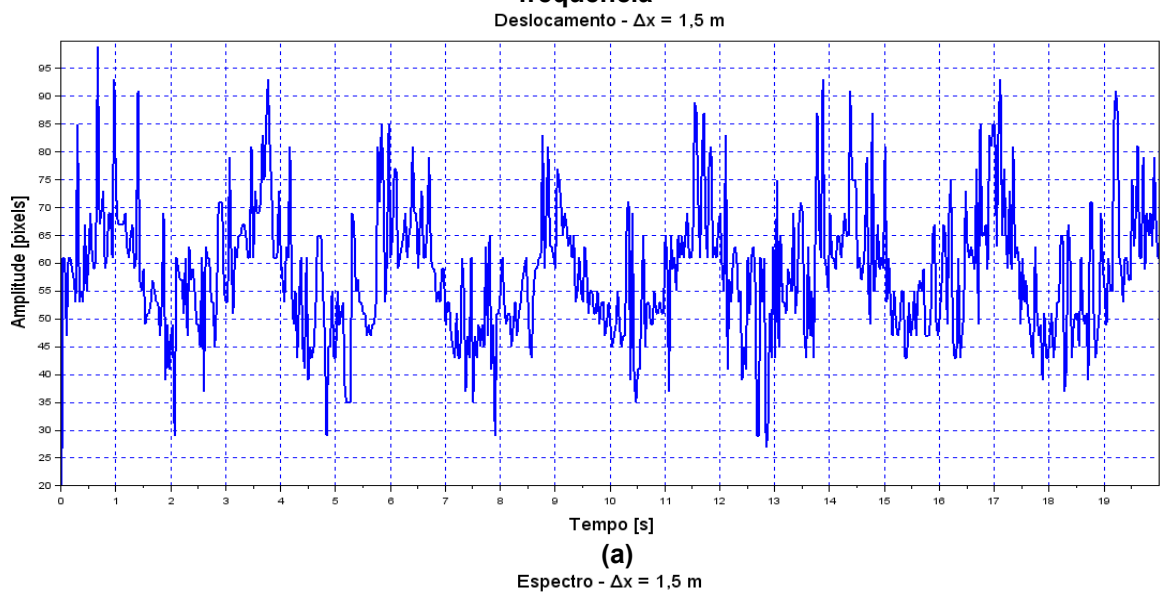
Deslocamento -  $\Delta x = 1$  m



(a)



**Figura 17 - Resultados para  $\theta$  maiores sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência**





## 4.2 RESULTADOS SEGUNDO EXPERIMENTO

Nas Figuras 18 e 19 são mostrados os resultados obtidos no segundo experimento, fazendo a comparação dos resultados do modelo teórico alimentado pelos dados coletados pelo acelerômetro com a resposta experimental medida pelo método proposto, ou seja a fotogrametria digital. Ilustra-se através destas o comportamento do sinal no tempo assim como seus respectivos espectros de frequência para ambos os casos analisados. Para este experimento o intervalo de tempo analisado foi de 0 a 6 segundos, e o intervalo de frequência foi de 0 a 6,0 Hertz.

Pelos resultados demonstrados, nota-se que para ambos os casos os dados da resposta teórica comparado com a curva experimental possuem concordância, principalmente quando observado o gráfico da frequência, do qual a frequência natural ( $f$ ) ficou em torno de 3,2 Hz. A diferença desta para o valor calculado analiticamente se deve ao fato de o sistema ter sido considerado em vibração livre, quando na verdade há um amortecimento ocorrendo.

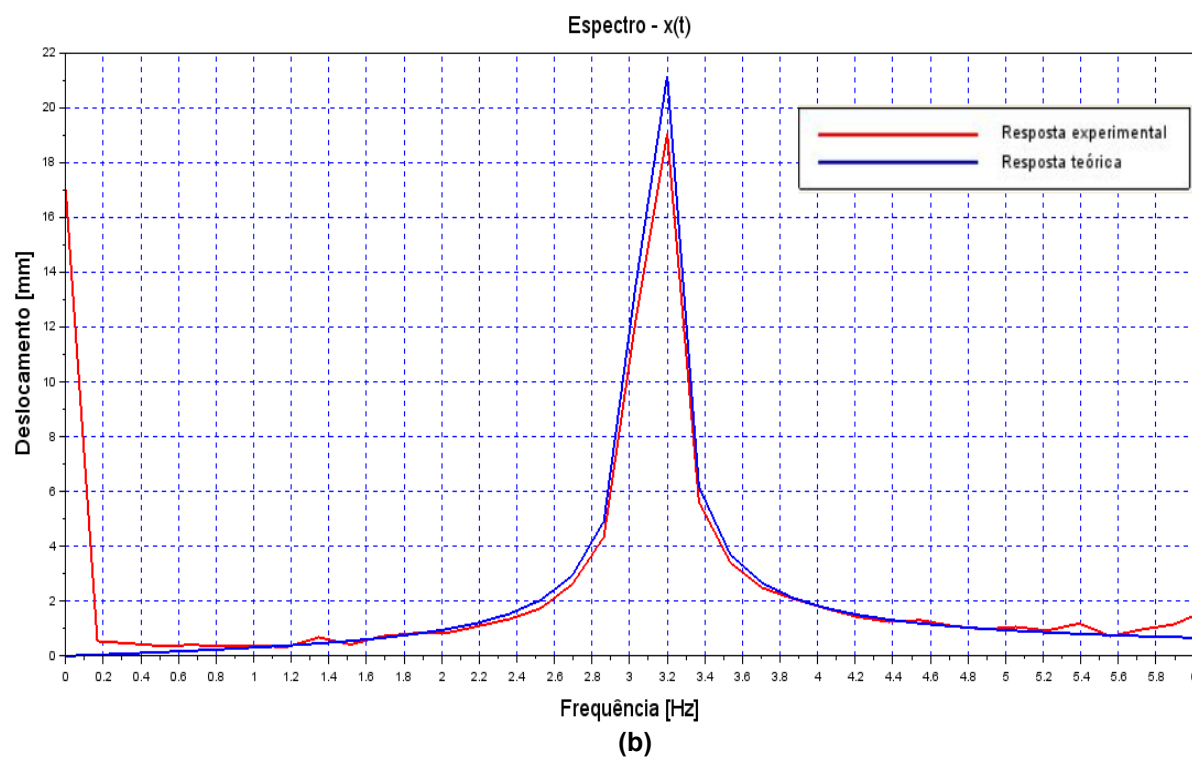
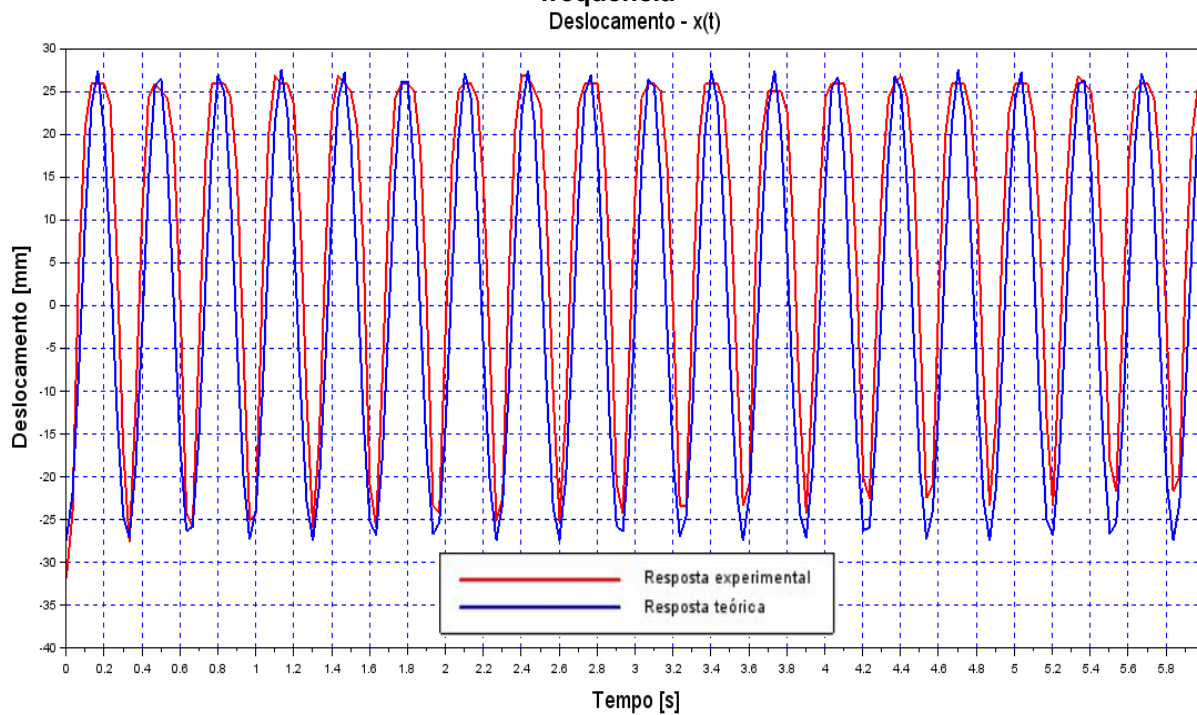
Na Tabela 3 é mostrado um quadro comparativo entre os valores de frequência para cada caso, assim como suas respectivas diferenças.

**Tabela 3 - Quadro comparativo dos resultados do segundo experimento**

		$f$ [Hz]	Diferença %
Caso sem flash	Experimental	3,20	0,63
	Teórico	3,18	
Caso com flash	Experimental	3,20	0,31
	Teórico	3,19	

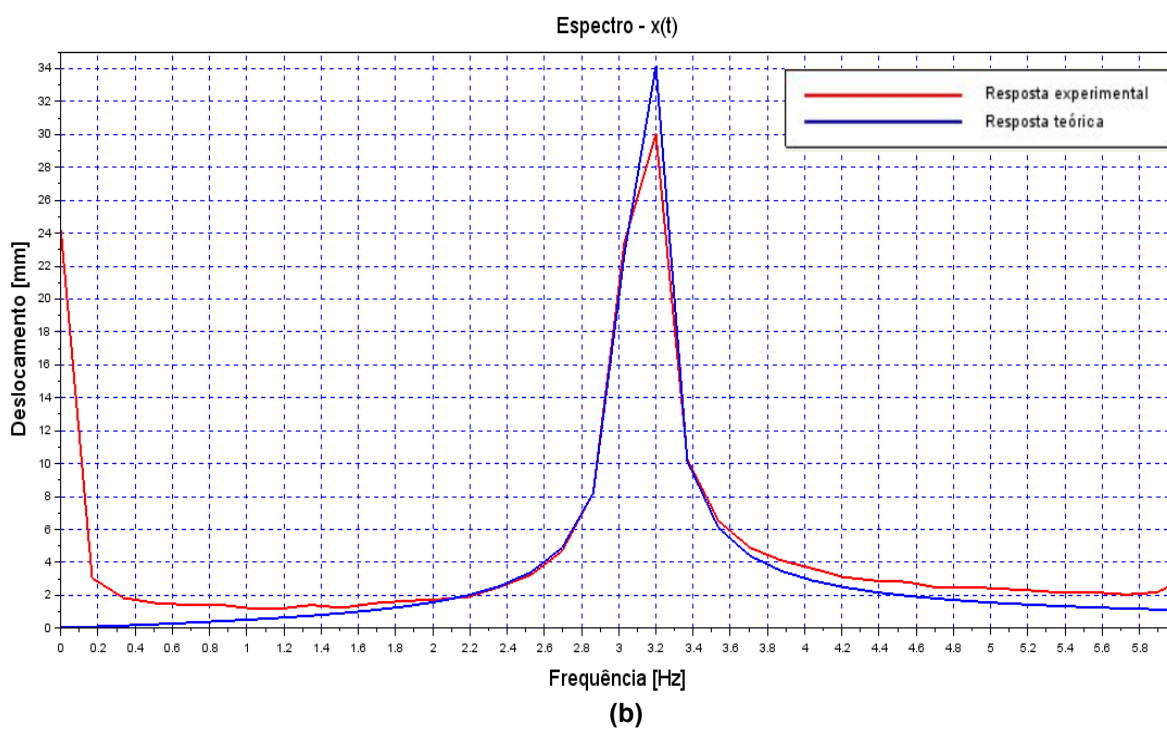
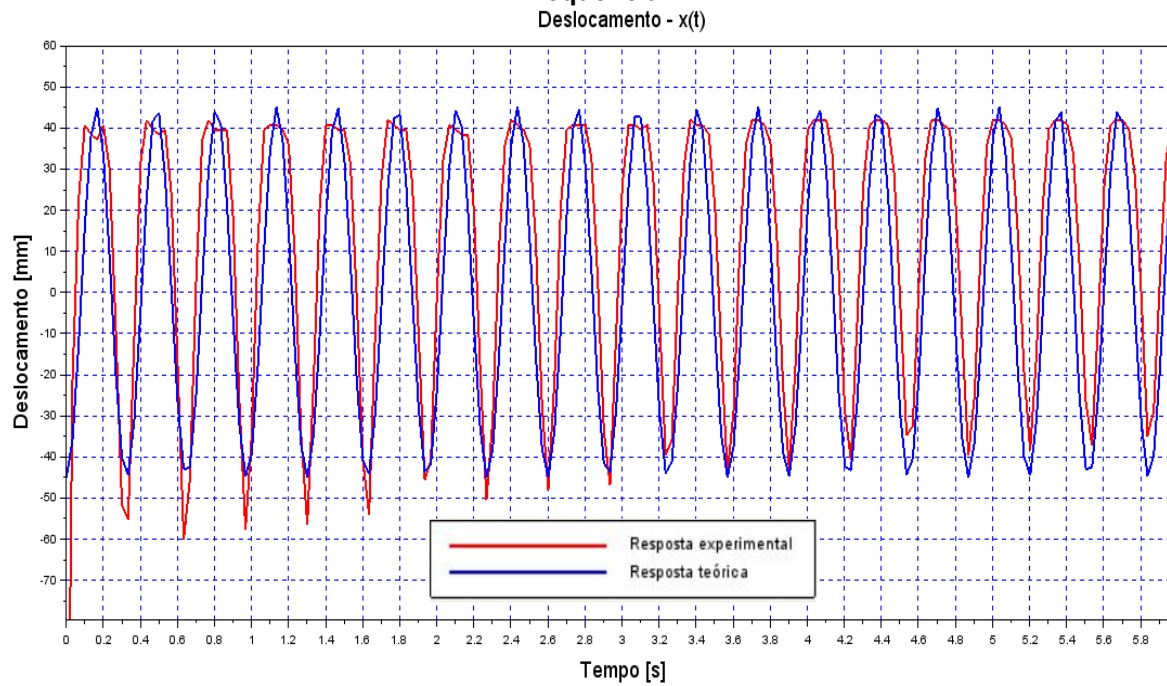
Fonte: autoria própria

Figura 18 - Resultados do caso sem flash sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência



Fonte: autoria própria

Figura 19 - Resultados do caso com flash sendo (a) no domínio do tempo e (b) no domínio da frequência



Fonte: autoria própria

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido uma metodologia para medição de vibração via captura de imagem, utilizando como base a fotogrametria digital. Para a verificação da metodologia, foram realizados dois experimentos. O primeiro sendo a captação do sinal de um pêndulo simples com excitação manual, comparando os resultados de frequência natural obtidos com as de um modelo teórico analítico. O segundo se refere a uma barra com uma mola acoplada vibrando também com excitação inicial manual, comparando os resultados obtidos com os de um modelo teórico, alimentado com os dados captados por um acelerômetro

A partir dos resultados apresentados no primeiro experimento, foi possível afirmar que para oscilações muito pequenas, onde ocorre a sobreposição dos alvos, este método não foi eficaz. Já para oscilações maiores, a fotogrametria digital mostrou-se consistente, chegando a 2,6% de diferença para frequência natural. Destaca-se que quanto mais próximo do alvo estiver a câmera, melhor a qualidade dos resultados. O sinal de deslocamento no tempo demonstrou certos níveis de ruído. Isto pode ter ocorrido pela sensibilidade do método e do programa quanto à luminosidade e possíveis reflexos presentes durante a gravação dos vídeos. Outro motivo pode ter sido a não utilização da função de normalização no algoritmo, da qual utiliza relações entre planos para a realização dos cálculos, enquanto que no algoritmo fez-se o uso de vetores, ajustados por um fator obtido.

Com o segundo experimento, conclui-se que o sinal sem o uso do flash se comportou de forma mais consistente que o caso com flash, porém ambos os resultados de frequência natural foram satisfatórios, com até 0,6% de diferença. Os diferentes efeitos de comportamento podem ter ocorrido pela luminosidade excessiva e possíveis reflexos causados pelo flash da câmera, interferindo na qualidade da binarização e limiarização da imagem.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Para casos de oscilações muito pequenas, sugere-se utilizar a técnica de rastreamento de pontos. Ou também o método da geometria do ponto, o qual leva em consideração o tamanho do ponto analisado, conforme seu centroide e seu baricentro;
- Acrescentar o cálculo dos fatores de amortecimento no código, para o segundo experimento, já que foi considerado vibração livre, enquanto que houve um leve amortecimento no sistema;
- Realizar os cálculos fazendo o uso do fator de escala para se chegar a resultados mais precisos de deslocamentos;
- Fazer testes para medir toda a estrutura, já que no presente trabalho foi demarcado apenas um alvo de interesse.

## REFERÊNCIAS

- BAQERSAD, J. et al. Photogrammetry and Optical Methods in Structural Dynamics. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2011.
- CHEN, C.-C. et al. Measurement. **Application of digital photogrammetry techniques in identifying the mode shape ratios of stay cables with multiples camcorders**, 2015.
- DEBELLA-GILO, M.; KÄÄB, A. Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 130-142, January 2011.
- EWINS, D. J. Modal Testing. **Theory, Practice and Application**, London, Research Studies Press, n. 2, 2000.
- FENG, D.; FENG, M. Q. Vision-Based Multipoint Displacement Measurement for Structural Health Monitoring. **Structural Control and Health Monitoring**, 2015.
- FENG, Z.; MA, H.; ZUO, M. J. Vibration signal models for fault diagnosis of planet bearings. **Journal of Sound and Vibration**, v. 370, p. 372-393, 26 May 2016.
- GIRDHAR, P. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**. Newnes. [S.I.]. 2004.
- HELFRICK, M. N.; NIEZRECKI, C.; AVITABILE, P. Curvature methods of damage detection using digital image correlation. **Health Monitoring of Structural and Biological Systems**, n. SPIE 7295, April 2009.
- KOHUT, P. et al. Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements. **Structural Health Monitoring**, May 2013.
- LEE, J. J.; SHINOZUKA, M. Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques. **Experimental Mechanics**, v. 46, p. 105-114, February 2006.
- LIU, W. Y. et al. The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015.
- MARIOTT, C. A.; SILVEIRA, N. J. **Análise de Vibrações por Processamento de Imagens**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, p. 104. 2015.
- O'BYRNE, M. et al. Acquisition and Analysis of Dynamic Responses of a Historic Pedestrian Bridge using Video Image Processing. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 628, 2015. IOP Publishing Ltd.

OLASZEK, P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method. **Measurement**, v. 25, p. 227-236, April 1999.

PATSIAS, S.; W. J., S. Damage Detection Using Optical Measurements and Wavelets. **Structural Health Monitoring**, 2002.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. Análise de Imagens Digitais. **Princípios, Algoritmos e Aplicações**, São Paulo, 2008. Thomson.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SICARD, J.; SIROHI, J. Measurement of the deformation of an extremely flexible rotor blade using digital image correlation. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 6, May 2013. IOP Publishing Ltd.

SOTELO JR., J.; FRANÇA, L. N. F. **Introdução às Vibrações Mecânicas**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

SZELISKI, R. Computer Vision. **Algorithms and Applications**, 3 September 2010. Springer.

VOLFF, M. S. **Análise de Vibrações via Fotogrametria Digital: Estudo de Sistema com 1 Grau de Liberdade**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, p. 43. 2017.

WAHBEH, A. M.; CAFFREY, J. P.; MASRI, S. F. A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems. **Smart Materials and Structures**, v. 12, September 2003.