

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATEUS SCHÜLER VOLFF

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES VIA FOTOGAMETRIA DIGITAL: ESTUDO DE SISTEMA
COM 1 GRAU DE LIBERDADE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

MATEUS SCHÜLER VOLFF

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES VIA FOTOGRAMETRIA DIGITAL: ESTUDO
DE SISTEMA COM 1 GRAU DE LIBERDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – 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

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise de Vibrações via Fotogrametria Digital: Estudo de Sistema com 1 Grau de Liberdade

Mateus Schüler Volff

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 09/06/2017 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. Gilson Adamczuk Oliveira
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Robson Gonçalves Trentin
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

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

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

Dedico este trabalho a meus pais, Wando e Neli.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais Wando e Neli pelo amor e apoio moral para enfrentar todo e qualquer desafio que encontro. Agradeço ao Professor Paulo Novak pela ajuda e orientação, que por hora conclui-se neste trabalho, mas que se estendeu por mais da metade do tempo que estive na UTFPR e que teve grande importância na minha formação. Agradeço a Equipe Pato Baja por gentilmente cederem parte do material usado na condução das atividades deste trabalho. Agradeço a todos os professores e colegas que de alguma forma contribuíram com sua atenção, conhecimento e bondade para comigo neste tempo que estive aqui.

Two elements must therefore be rooted out once for all, – the fear of future suffering, and the recollection of past suffering; since the latter no longer concerns me, and the former concerns me not yet. (Seneca).

RESUMO

VOLFF, Mateus S. Análise de Vibrações via Fotogrametria Digital: Estudo de Sistema com 1 Grau de Liberdade. 2017. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso–Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho relata o desenvolvimento e teste de um sistema de sensoriamento para análise de vibrações utilizando captação e processamento de imagens digitais (fotogrametria digital) de modo a obter a função deslocamento de um sistema mecânico de 1 Grau de Liberdade. O sistema consiste de uma câmera digital doméstica e um computador para o processamento das imagens. O cálculo dos deslocamentos foi efetuado utilizando o algoritmo *Digital Image Correlation* (DIC). Os resultados foram comparados com a resposta obtida a partir de um sensor convencional, neste caso um acelerômetro. Foi constatada boa concordância entre os dois sistemas na estimativa da frequência natural do sistema e nas funções de deslocamento, e uma precisão menor na obtenção do fator de amortecimento, com razões entre o sistema proposto e o sistema convencional estando indo de 0,994 a 0,996 para a frequência natural e 1,15 a 1,35 para o fator de amortecimento.

Palavras-chave: DIC. Digital Image Correlation. Deslocamentos. Frequência Natural.

ABSTRACT

VOLFF, Mateus S. Vibration Analysis via Digital Photogrammetry: Study of a Single Degree of Freedom System. 2017. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This work reports the development and testing of a sensing system for vibration analysis using digital image capture and processing (digital photogrammetry) in order to obtain the displacement function of a SDOF mechanical system. The system consists of a home digital camera and a computer for image processing. The computation of the displacements was done using the Digital Image Correlation (DIC) algorithm. The results were compared with the response obtained from a conventional sensor, in this case an accelerometer. A good agreement was found between the two systems in the estimation of the natural frequency of the system and the displacement functions, and a lower accuracy in obtaining the damping factor, with ratios between the proposed system and the conventional system ranging from 0.994 to 0.996 for the natural frequency and 1.15 to 1.35 for the damping factor.

Keywords: DIC. Digital Image Correlation. Displacements. Natural Frequency.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Esquema generalizado do sistema proposto – p.12
- Figura 2 – Esquema construtivo de um acelerômetro – p.16
- Figura 3 - Quadro comparativo de métodos de sensoriamento de estruturas - p.18
- Figura 4 – Frame para teste em laboratório – p.20
- Figura 5 – Estudo de rotação de pás altamente flexíveis – p. 21
- Figura 6 – Princípio básico do método de sensoriamento – p.23
- Figura 7 – Formação da imagem – p. 24
- Figura 8 – Fluxograma de etapas do processamento de imagem – p. 26
- Figura 9 – Processo de limiarização – p. 27
- Figura 10 - Determinação da Região de Interesse – p.27
- Figura 11 – Exemplo de gráfico da função CCN – p.29
- Figura 12 – Desenho esquemático do sistema analisado – p. 31
- Figura 13 – Aparato experimental – p. 32
- Figura 14 – Quadro de calibração – p. 33
- Figura 15 – Quadro comparativo dos resultados dos quatro pontos analisados – p.36
- Figura 16 – Resultados do Ponto 1 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência – p.36
- Figura 17 – Resultados do Ponto 2 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência –p. 37
- Figura 18 – Resultados do Ponto 3 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência – p. 37
- Figura 19 – Resultados do Ponto 4 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência – p. 38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Motivação	11
1.2 Objetivos	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Limitações dos sensores convencionais usados em dinâmica estrutural ..	15
2.2 Exemplos de aplicações de técnicas baseadas em imagens digitais em dinâmica estrutural.	19
3 SISTEMA DE ANÁLISE VIA FOTOGRAMETRIA	23
3.1 Formação da imagem	24
3.2 Processamento da imagem e obtenção dos deslocamentos	25
3.2.1 Limiarização	26
3.2.2 Determinação da Região de Interesse (RI)	27
3.2.3 Interpolação entre pixels	27
3.2.4 Cálculo do deslocamento via Função de Correlação Cruzada Normalizada....	28
3.2.5 Fator de escala.....	29
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
4.1 Sistema mecânico analisado	31
4.2 Equipamento utilizado	32
4.3 Medições	33
5 RESULTADOS	35
6 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se obter dados confiáveis de maneira prática e com custo acessível na análise de dinâmica de estruturas tem fomentado interesse recente na pesquisa e desenvolvimento de métodos mais sofisticado de sensoriamento da estrutura, seja no desenvolvimento de hardware ou em metodologias e algoritmos de processamento de dados. Questões como precisão, praticidade operacional, custo, tempo computacional, número de pontos medidos simultaneamente e robustez da técnica são alguns dos parâmetros.

1.1 Motivação

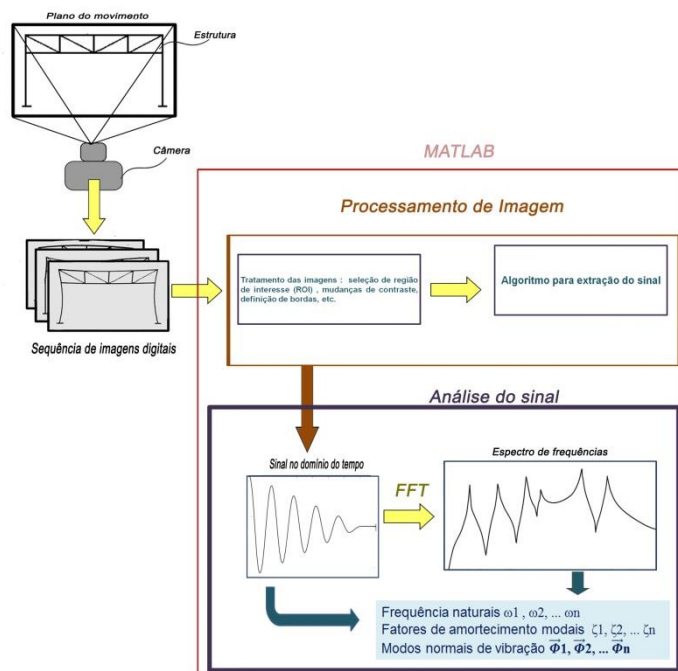
As informações obtidas através da Análise Modal Experimental (AME) são importantes tanto na fase de projeto da estrutura como durante seu acompanhamento durante o serviço. Ainda na etapa de concepção, estas informações são usadas na verificação, refino e atualização de modelos numéricos, de forma a corrigir as imprecisões - sempre presentes em qualquer modelo de sistemas em engenharia, uma vez que estes são necessariamente idealizações do sistema físico real. Já na fase de operação, o acompanhamento do comportamento da estrutura, utilizando técnicas com o Monitoramento de Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring*, ou SHM na sigla em inglês) depende de dados precisos sobre o deslocamento da estrutura, usados para determinar seus parâmetros modais, cuja mudança repentina pode indicar a presença de uma falha na estrutura.

De modo a realizar as atividades descritas acima, medições confiáveis da resposta dinâmica da estrutura precisam ser realizadas. Além da habilidade e experiência daquele realizando a experiência, a qualidade dos dados obtidos depende do desempenho do sistema de sensoriamento usado. As tecnologias tradicionais de sensoriamento, como acelerômetros, extensômetros (na categoria dos sensores que necessitam contato com a estrutura) ou vibrômetros a *Laser* (na categoria dos sensores de não contato), apesar de precisas e eficazes na maioria

dos casos, possuem limitações em determinadas situações, devido a sua natureza intrusiva (influenciando as medições) e capacidade de medir o movimento de um número limitado de pontos da estrutura.

Visando contornar os problemas apresentados pelos sensores convencionais citados acima a comunidade científica tem, nas últimas décadas, colocado seu esforço na pesquisa de técnicas de sensoriamento baseadas na aquisição e processamento de imagens digitais. Usando uma ou mais câmeras, o movimento de múltiplos pontos da estrutura pode ser monitorado e, com o auxílio de algoritmos de processamento de imagens, que permitem identificar bordas, mudanças de escala de luminosidade e comparação entre múltiplas imagens e uma referência, extraírem os sinais de deslocamento, parâmetros modais (frequências naturais e fatores de amortecimento e modos normais de vibração *mode shapes*), de modo econômico e com suficiente precisão. A Figura 1 ilustra de modo simplificado, o processo de sensoriamento por imagens digitais proposto por este trabalho.

Figura 1 – Esquema generalizado do sistema proposto



Fonte: autoria própria

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são (i) o desenvolvimento de um sistema de medição para análise de vibração de estruturas baseado em fotogrametria digital, usando uma câmera comercial e um algoritmo de processamento baseado em linguagem de alto nível (e.g. MATLAB) e; (ii) mensurar seu desempenho (i.e. precisão), confrontando os resultados obtidos com medições feitas por um sensor convencional (acelerômetro);

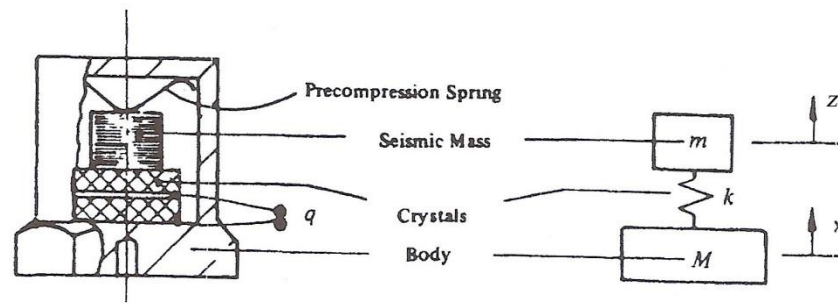
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Limitações dos sensores convencionais usados em dinâmica estrutural

Experimentos constituem uma etapa importante na análise de fenômenos vibratórios em engenharia, e os resultados obtidos em testes realizados tanto em laboratório como em campo, com a máquina ou estrutura já em operação, possuem um grande valor. 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) e seu desenvolvimento constitui um campo de pesquisa ativo até os dias de hoje, e.g. Feng, Ma e Zuo (2016) e Cui *et al* (2016). O acompanhamento do comportamento vibratório de estruturas é uma parte importante da avaliação de sua integridade e possui ampla aplicação em áreas como engenharias aeroespacial engenharia civil e no setor energético, como do diagnóstico de turbinas (LIU *et al*, 2015). A utilidade dos dados empíricos se torna evidente mesmo na fase de projeto e otimização da estrutura, usados para a verificação e refino de modelos numéricos baseados em Elementos Finitos (WANG *et al*, 2009), uma vez que qualquer modelo matemático é necessariamente uma idealização do sistema físico que se propõe a representar e, portanto, possui discrepâncias intrínsecas.

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 (da sigla em inglês para *Linear Variable Differential Transformer*) (BAQERSAD *et al.*, 2017) sendo o acelerômetro o de uso mais difundido. Em uma de suas construções mais comuns a aceleração do ponto sobre o qual o sensor está montado é medida através da tensão elétrica gerada por um cristal piezolétrico, que sofre uma deformação proporcional à força inercial de uma massa sísmica, esta diretamente relacionada à aceleração sofrida pelo ponto medido. Sua construção é representada na Figura 2

Figura 2 – Esquema construtivo de um acelerômetro



Fonte: Ewins (2000)

Apesar de sua alta precisão, o uso de acelerômetros trás alguns inconvenientes e limitações. Uma alta densidade de sensores sobre a estrutura torna o trabalho de instalação demorado e tedioso (CHEN *et al.*, 2015b; FENG; FENG, 2015). Os fios e cabos necessários para transmissão de dados dificultam seu uso para medições de partes em rotação (BAQERSAD *et al.*, 2017). Estes problemas são agravados nas análises de campo de grandes estruturas, onde os pontos de medição podem ser de difícil acesso, e.g. pontes suspensas (OLASZEK, 1999) e locais com altos níveis de radiação e calor (LEE; RHEE, 2013). Quando a estrutura é esbelta ou possui pequenas dimensões, como modelos em escala de estruturas para análise de laboratório, a presença dos sensores sobre a estrutura influencia sua massa e rigidez (CHEN *et al.*, 2015b; JURJO *et al.*, 2010; WU *et al.*, 2014) e, por consequência, em sua resposta na medição. Além disso, como está em contato direto com a estrutura, os acelerômetros estão submetidos aos mesmos esforços dinâmicos, afetando sua durabilidade (WU *et al.*, 2014).

Estes inconvenientes podem ser contornados usando-se sensores ópticos. Nesta categoria, o mais tradicional e amplamente usado é o Vibrômetro Doppler a Laser (*Laser Doppler Vibrometer* – LDV). Este possui problemas de permitir medições apenas em pontos discretos da estrutura, o que pode tornar o tempo total de medição impraticavelmente grande, quando vários pontos são necessários para a reconstrução dos modos de vibração. Apesar de variações desta tecnologia como o *Continuously Scanning Laser Doppler Vibrometer* (CSLDV) e *Fast Scan SLDV* (FS-SLDV) terem sido desenvolvidas para compensar as limitações citadas anteriormente (HELFRICK *et al.*, 2011) todas ainda possuem um alto custo. Além disso, para medições de longa duração, a exposição à radiação emitida pelos equipamentos constitui um risco à saúde humana (KOHUT *et al.*, 2013). Outros

métodos que utilizam *laser* são os baseados em interferometria, como *Electronick Speckle Pattern Interferometry* (ESPI), e o *Digital Speackle Shearography*, e.g. Francis, James e Tatam (2008).

Os problemas apresentados pelas técnicas tradicionais de sensoriamento, o avanço da tecnologia das câmeras digitais, sendo esta uma tecnologia muito mais acessível, além do aumento de capacidade de armazenamento e processamento dos computadores (BAQERSAD *et al.*,2017) impulsionaram o desenvolvimento de novas ferramentas de aquisição de dados, baseadas na captura e processamento de imagens digitais, conhecidas na literatura como fotogrametria digital, videogrametria, computer-vision, entre outros. Apesar de muitas aplicações necessitarem de câmera de alta resolução e alta taxa de amostragem (quantos frames por segundo, ou FPS, a câmera consegue gravar), sendo esta uma tecnologia pouco acessível, há ainda uma quantidade alta de aplicações de baixas frequência e grandes deslocamentos (como monitoramento de integridade estrutural de pontes e edifícios (SON *et al.*, 2015) cujos requisitos de qualidade e taxa de amostragem são atendidos de maneira satisfatória por câmeras comuns de uso doméstico (CHEN *et al.*,2015a).

A Figura 3 apresenta um quadro comparativo das diversas técnicas usadas atualmente para sensoriamento de estruturas.

Figura 3 - Quadro comparativo de métodos de sensoriamento de estruturas

Sensores Pontuais de Contato (Acelerômetros, Extensômetros e LVDT's)	Técnicas de Interferometria (ESPI, DSS)	LDV(Laser Doppler Vibrometer)	Fotogrametria
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 de funções de transferência	Fácil obtenção das funções de transferência	Necessita de pós-processamento para obtenção das funções de transferência
Obtenção de dados somente a respeito dos pontos medidos	Dados sobre toda a superfície do objeto	Dados disponíveis em ponto pré-definido	Dados disponíveis sob toda superfície do objeto
A sensibilidade em cada ponto depende do transdutor	Sensibilidade diminui a medida que aumenta o campo de visão	Sensibilidade está relacionada com o comprimento de onda do laser	Sensibilidade diminui com o aumento do campo de visão
Ampla faixa de frequência	Melhor para medições de baixa frequência	Maior faixa de frequência	Melhor desempenho para medições de baixas frequências
Não possui sensibilidade a movimentos de corpo rígido	Calibração muito sensível as condições de operação	Calibração altamente sensível as condições operacionais e movimentos de corpo rígido	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	Resolução espacial muito alta (DIC)
Devido a problemas de sensibilidade, é muito difícil de extrair ambos os modos de corpo rígido e modos 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 consomem muito tempo	Medições consomem muito pouco tempo
Processamento dos dados muito rápido	Processamento de dados rápido	Processamento de dados rápido	Tempo de processamento depende da técnica usada
Permite processamento on-line	Não aplicado a estruturas altamente flexíveis	Não aplicado à estruturas altamente flexíveis	Apropriado a estruturas altamente flexíveis
Dependendo do tipo do sensor, apenas mede o deslocamento, a aceleração, ou deformação	Mede deslocamento e deformação	Mede velocidade; com equipamento extra pode ser usado para medir deformação	Mede deslocamento e deformação (DIC)
Difícil uso em partes rotativas devido à fixação	Aplicável em partes rotativas	Difícil uso em partes rotativas	Apropriado para partes rotativas

Fonte: Baqersad *et al.* (2017)

As técnicas fotogramétricas variam na maneira como o movimento dos pontos de interesse é identificado e nos algoritmos de processamento. De um modo geral, as técnicas se dividem nas seguintes categorias (BAQERSAD *et al.*,2017):

- As técnicas denominadas por *Point Tracking*, e.g. Lee e Shinozuka (2006), em que alvos são colocados sob a superfície da estrutura em pontos de interesse, e as posições destes pontos discretos ao longo do tempo são monitoradas pela câmera.
- O conjunto de técnicas denominado *Digital Image Correlation* (DIC) um padrão ou textura é distribuído sobre a superfície da estrutura, e.g. Reu *et al.* (2016) e

o sinal de deslocamento é extraído a partir de um algoritmo que identifica as diferenças nas imagens com uma imagem de referencia.

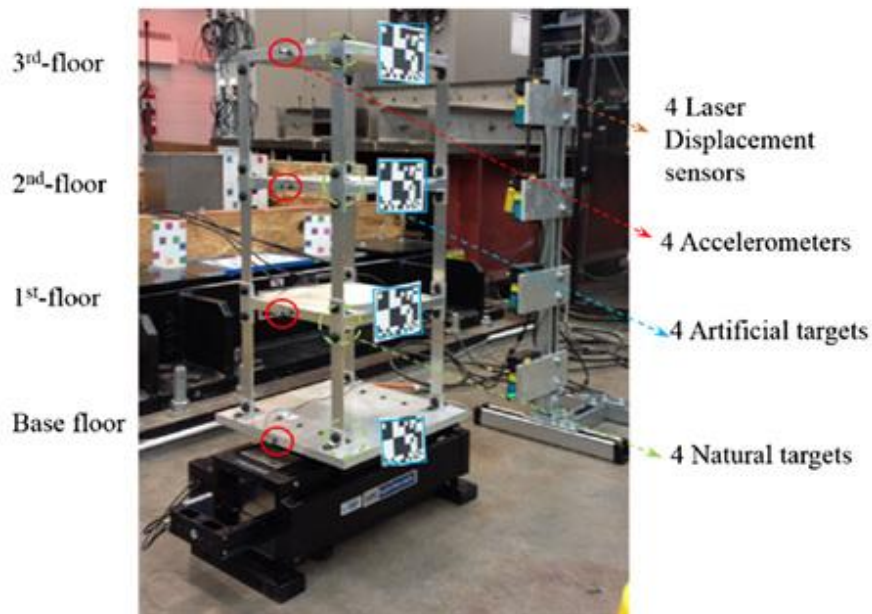
- Há também as técnicas que não usam alvos ou padrões (*targetless*) que usam características da própria estrutura para identificar o movimento, e.g. Bartilson, Wieghaus e Hurlbaeus (2015), Yoon *et al.* (2016).

2.2 Exemplos de aplicações de técnicas baseadas em imagens digitais em dinâmica estrutural.

Técnicas de análise de dinâmica estrutural tem sido um campo ativo de pesquisa nos últimos anos.

Uma das áreas onde a literatura apresenta uma grande riqueza de exemplo e aplicação das técnicas de sensoriamento via imagens é no monitoramento de integridade estrutural, *Structural Health Monitoring* em inglês (SHM). Patsias e Staszewskiy (2002) usaram um algoritmo de detecção de bordas para identificação de defeitos em uma viga engastada. Feng e Feng (2015) obtiveram frequências naturais e modos normais de vibração de uma estrutura tipo frame em testes de laboratório (Figura 4) e obtiveram boa concordância com resultados obtidos com medições feitas com sensores de deslocamento a laser e acelerômetros. Foram feitos experimentos usando dois tipos de alvos: quadros com um padrão preto-e-branco de alto contraste e alvos naturais (i.e. como juntas parafusadas da estrutura) e obtiverem bons resultados em ambos os casos.

Figura 4 – Frame para teste em laboratório



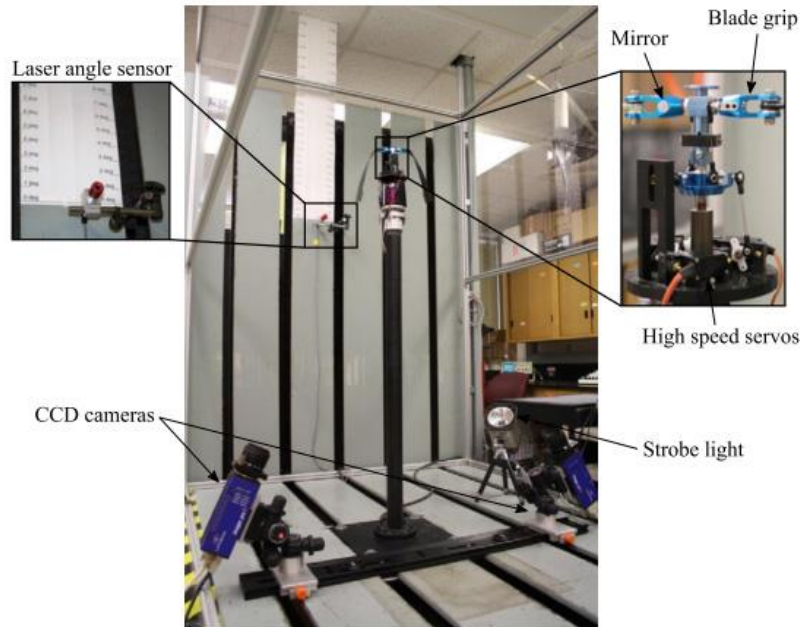
Fonte: Feng e Feng (2015)

A inspeção e avaliação de pontes usando técnicas de imagens digitais é um campo da pesquisa prolífico em SHM. Um dos primeiros esforços na tentativa de usar fotogrametria na avaliação de pontes foi feito por Olaszek (1999). Wahbeh, Caffrey e Masri (2003) utilizaram luzes de LED como alvos. Usando uma câmera comercial e lentes telescópicas, Lee e Shinozuka (2006) conseguiram medir a frequência do movimento de pontes durante tráfico de veículos, com medições feitas a uma distancia de 70 m, com resultados em conformidade com obtidos através de um LDV, demonstrando que a técnica é precisa e de baixo custo. O'Byrne *et al.* (2015) compararam os resultados no cálculo da frequência fundamental de uma ponte quando excitada pela passagem controlada de pedestres, usando dados obtidos através de medições com uma câmera comercial e acelerômetros, e conseguiu boa correlação.

O uso de técnicas baseadas no processamento de imagens digitais tem uma boa aplicabilidade em sistemas com partes rotativas, como já mencionado anteriormente, devido a ausência de fiação e da capacidade destes sistemas captarem movimentos de corpo rígido e movimento fora do plano de rotação. Com uso de uma lâmpada estroboscópica e um sistema com duas câmeras (*stereo*). Helfrick, Niezrecki e Avitabile (2009) monitoraram a vibração em pás de um

ventilador em múltiplos pontos simultaneamente. Sicard e Sirohi (2013) utilizaram uma técnica parecida para rotores de alta flexibilidade.

Figura 5 – Estudo de rotação de pás altamente flexíveis



Fonte: Sicard e Sirohi (2013)

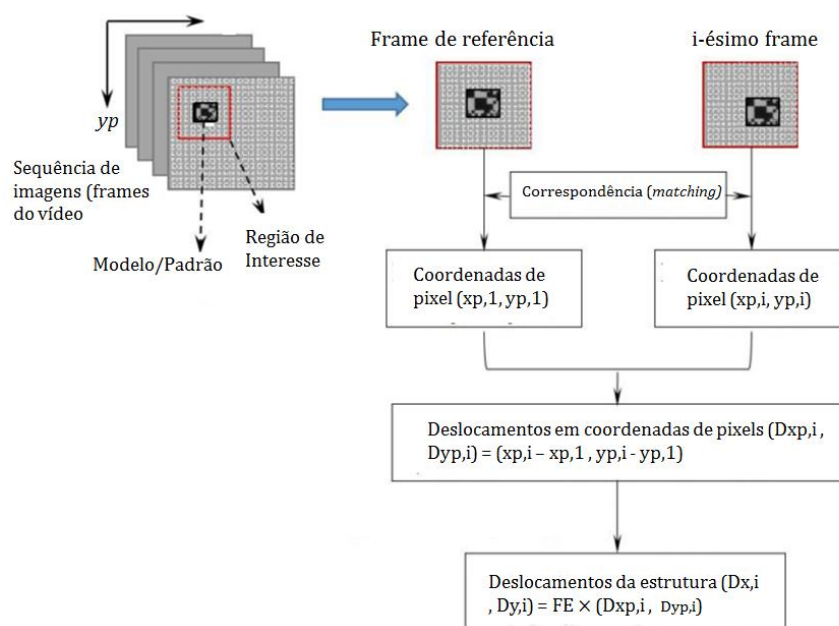
A proposta deste trabalho consiste em demonstrar a aplicabilidade da fotogrametria digital na análise de vibrações estruturais, em comparação com um método tradicional (acelerômetro). Para este trabalho, o algoritmo escolhido foi DIC, devido a sua simplicidade e fácil aplicação. A seguir é descrito o sistema de sensoriamento via fotogrametria digital (SSFD) desenvolvido.

3 SISTEMA DE ANÁLISE VIA FOTOGRAMETRIA

Este capítulo apresenta a técnica fotogramétrica usada para fazer a análise de vibrações. São apresentados os fundamentos de captação e processamento de imagem, cujo resultado final é o sinal de deslocamento da estrutura estudada. Dentre os vários métodos atualmente existentes, o método DIC (*Digital Image Correlation*) foi escolhido. Aqui, chama-se o sistema que compõe a captação da imagem, processamento desta e extração do sinal de deslocamento de Sistema de Sensoriamento via Fotogrametria Digital (SSFD).

O princípio básico do método é ilustrado na Figura 6. Uma série de imagens é registrada pela câmera (via gravação de um vídeo, cada imagem sendo um dos seus respectivos frames). O primeiro frame serve como imagem de referência, com quais os frames subsequentes são comparados via um critério de correspondência. A distância entre o padrão analisado na imagem de referência e no frame é computado em pixels e então multiplicado por um fator de escala (com dimensões de pixels/mm), de modo a obter-se o deslocamento da estrutura.

Figura 6 – Princípio básico do método de sensoriamento

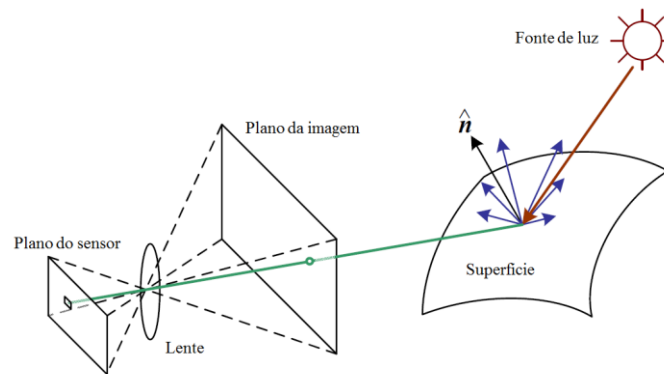


Fonte: adaptado de Feng (2016)

3.1 Formação da imagem

O caminho da informação que pretendemos obter começa pela formação da imagem. Para que isso seja possível, uma fonte luminosa deve irradiar sobre a superfície do objeto observado e refletir em direção à câmera, como mostra a Figura 7. No caso de uma câmera digital os fótons de luz atravessam a lente da câmera e a imagem é formada no plano do sensor.

Figura 7 – Formação da imagem



Fonte: Szeliski (2011)

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; SHWARTZ, 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 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 relação dada pela Equação 1

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

O produto dessa transformação é uma imagem digital, cujo modelo é dado pela função matricial $f(x,y)$, como mostra a Equação 2. Cada elemento da matriz $f(x,y) = \mathbf{A} = M \times N$ 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.

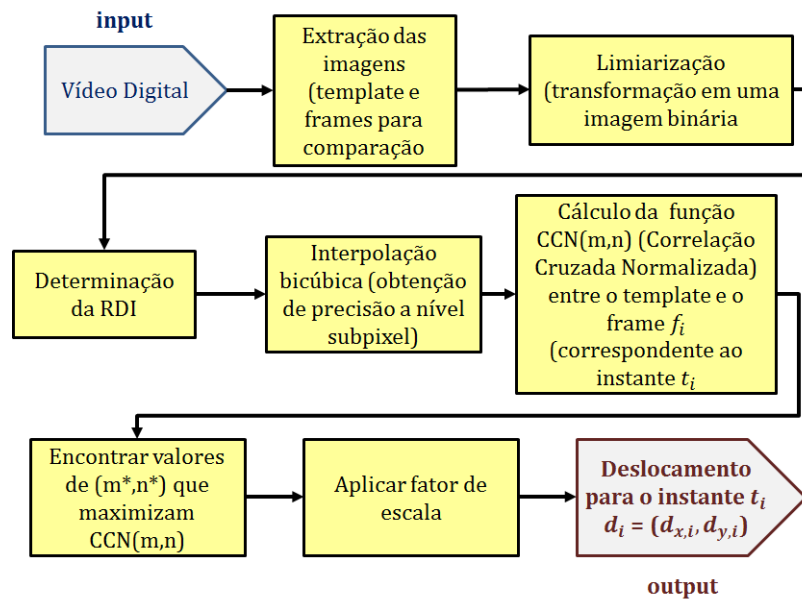
$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(1,0) & \dots & f(M-1,0) \\ f(0,1) & f(1,1) & \dots & f(M-1,1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(0,N-1) & f(1,N-1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.2 Processamento da imagem e obtenção dos deslocamentos

O método proposto consiste na utilização de imagens digitais para a obtenção do da função deslocamento de um ponto em uma estrutura que vibra. Para isso, a estrutura vibrando é filmada (sendo um filme nada mais que uma sequência de imagens tiradas a uma determinada taxa ou frequência) e cada frame do vídeo é comparado com uma imagem de referência e são destas comparações que são obtidas os deslocamentos. O método usado neste trabalho, DIC, usa a correlação cruzada entre o frame f_i e o template w para determinar o deslocamento.

A Figura 8 mostra o fluxograma das etapas do processamento da imagem para a obtenção do sinal de deslocamento. As etapas do processamento serão explicadas a seguir.

Figura 8 – Fluxograma de etapas do processamento de imagem

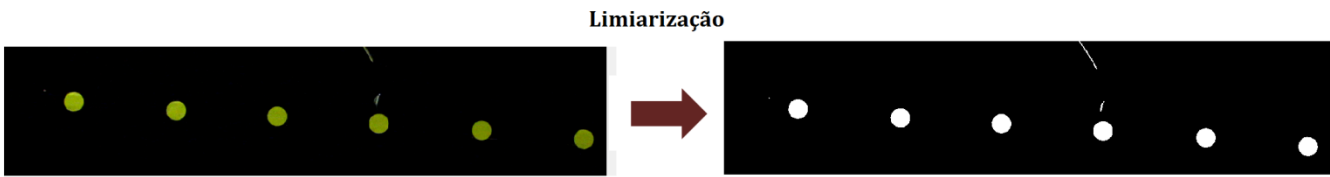


Fonte: autoria própria

3.2.1 Limiarização

Para que possamos calcular a função de correlação cruzada, cada elemento das matrizes que representam a imagem de referência e o frame para comparação deve ser um número real. As imagens retiradas do vídeo estão inicialmente no formato RGB, de modo que cada pixel (elemento da matriz) é representado por um vetor com três valores que representam os níveis de vermelho, verde e azul do pixel. Através de um processo chamado *limiarização*, devemos converter a imagem para uma escala de cinza, onde cada pixel possui um valor que varia entre v_{\min} , que significa completamente preto, e v_{\max} , completamente branco. Na prática, é computacionalmente mais econômico usar apenas dois níveis, com $f(x, y) = 0$ sendo preto e $f(x, y) = 1$ sendo branco. Com pixels com certo nível de intensidade (limiar) sendo transformados em pixels brancos e os que estão abaixo em pixels pretos. Para isso foi usada a função *im2bw* do Matlab. A Figura 9 ilustra o processo.

Figura 9 – Processo de limiarização

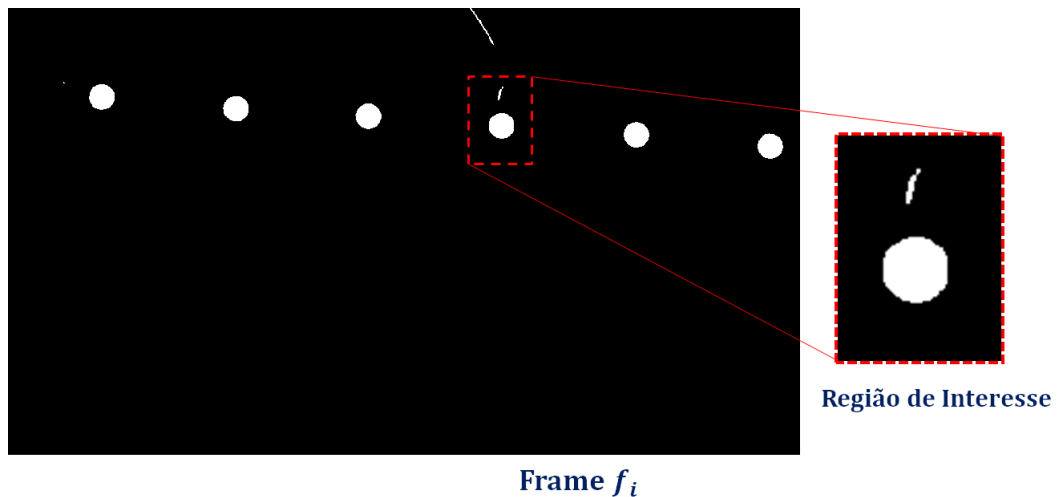


Fonte: autoria própria.

3.2.2 Determinação da Região de Interesse (RI)

De modo à reduzir o tempo computacional, a comparação entre as imagens é feita sobre um região delimitada da imagem chamada Região de Interesse (RI). A determinação da RI é feita de modo que o movimento do padrão de referência (no caso do exemplo da Figura 10, o círculo branco) esteja sempre dentro de seus limites.

Figura 10 - Determinação da Região de Interesse



Fonte: autoria própria

3.2.3 Interpolação entre pixels

Os valores possíveis de deslocamento obtidos através da função de Correlação Cruzada Normalizada, m^* e n^* terão necessariamente um precisão à

nível de pixels, esta sendo grandemente influenciada pela resolução da câmera usada. Uma opção para melhorar a precisão da medição do deslocamento é interpolar os valores dos pixels, conseguindo uma precisão a nível subpixel. Neste trabalho, foi escolhida a função bicúbica, 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 foi escolhida, pois não causa problemas de bordas serrilhadas, borramento e preserva detalhes finos da imagem (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

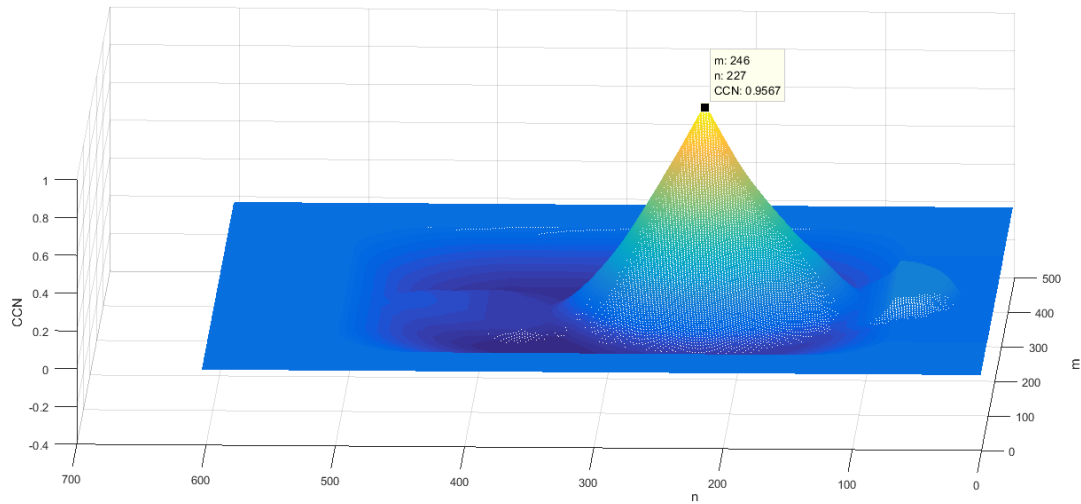
3.2.4 Cálculo do deslocamento via Função de Correlação Cruzada Normalizada

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; KÄÄB, 2010). Neste caso, as entidades são os padrões (como os círculos brancos mostrados na Figura 10), e a função CCN é calculada comparando-se a imagem de referência (neste caso do sistema mecânico na posição de equilíbrio estático) \mathbf{w} e os frames do vídeo \mathbf{f}_i

$$CCN_i(m, n) = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f_i(x, y) - \bar{f}_i] [w(x-m, y-n) - \bar{w}]}{\sqrt{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f_i(x, y) - \bar{f}_i]^2 [w(x-m, y-n) - \bar{w}]^2}} \quad (4)$$

A Figura 11 mostra o exemplo de um gráfico da função CCN, onde o pico é o local de máxima correlação entre as imagens.

Figura 11 – Exemplo de gráfico da função CCN



Fonte: autoria própria.

3.2.5 Fator de escala

O fator de escala é o valor de conversão das coordenadas da imagem (em pixels) para as coordenadas do mundo real (em mm). Para obtê-lo, registra-se uma imagem de um padrão com dimensões conhecidas no mundo real e mede-se a mesma distância em pixels, de modo que o fator de escala S é dado pela Equação 5.

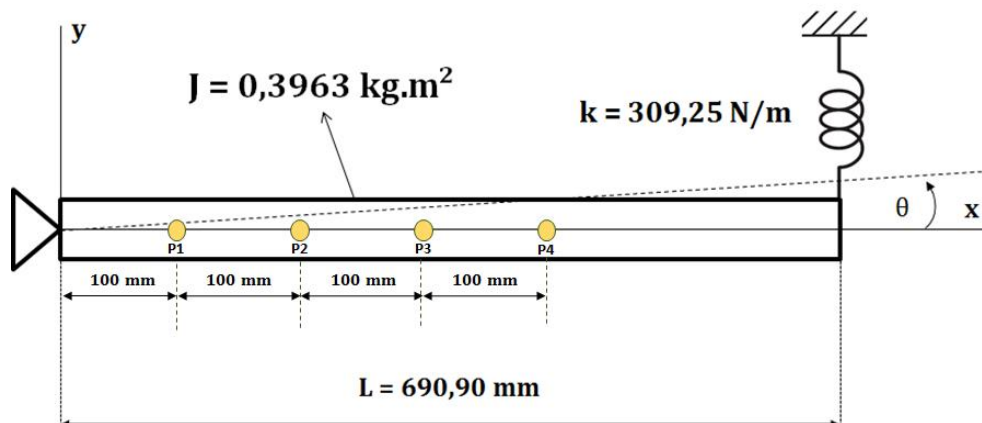
$$S = \frac{D_{real}}{D_{pixels}} \quad (5)$$

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 SISTEMA MECÂNICO ANALISADO

Para o experimento de validação foi analisado o movimento de um sistema de 1 Grau de Liberdade que consiste em uma barra rígida pinada em uma das pontas e suspensa por uma mola em outra. A Figura 12 mostra um desenho esquemático do sistema. A rigidez da mola k é conhecida e o momento de inércia de massa da barra J foi calculado a partir de sua pesagem e dimensões. Com base nestas informações, a expectativa era de que a frequência natural fosse próxima de 3,0 Hz, levando em consideração os erros nos sistemas de medição.

Figura 12 – Desenho esquemático do sistema analisado.

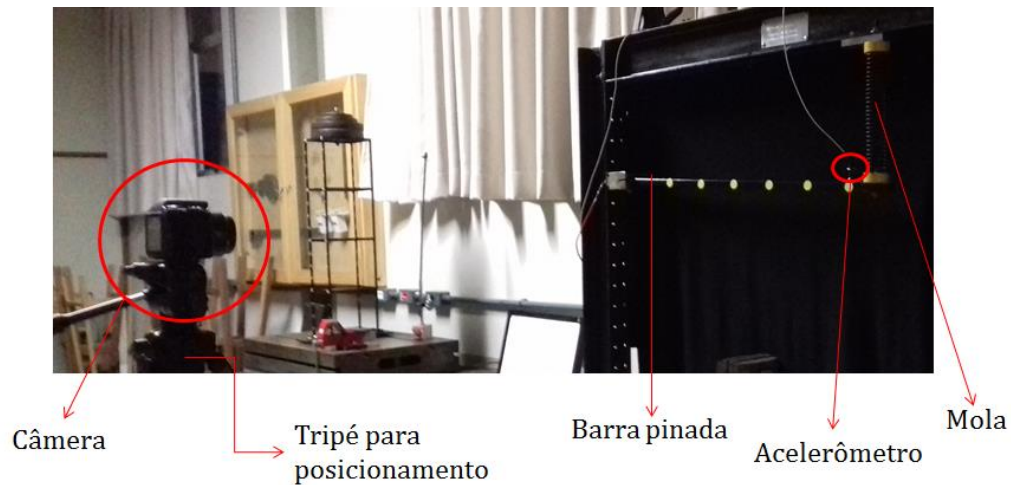


$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kL^2}{J}} \sim 3,07 \text{ Hz}$$

Fonte: autoria própria.

Como pode ser visto na Figura 13, aos fundos do plano do movimento foi colocado um pano preto e, sobre a superfície da barra, fita isolante preta foi fixada. Assim, apenas os movimentos dos alvos circulares seriam identificados quando feita binarização da imagem. O reflexo da fita que cobria o acelerômetro contaminava um pouco a imagem (ou seja, o círculo alvo não era a única região branca da imagem), mas observou-se que sua influência era pequena.

Figura 13 – Aparato experimental



Fonte: autoria própria.

4.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento utilizado consiste em uma câmera digital para captação da imagem. Para a captação da imagem, foi usada uma câmera Canon PowerShot SX520 HS. Esta possui as seguintes configurações

- Sensor CMOS 16.0 megapixels de 1/2.3 polegadas;
- Distância focal 4.3 (W) – 180.6 (T) mm (equivalente filme 35 mm: 24 – 1008 mm);
- Abertura do obturador: f/3.4 (W) – f/6.0 (T);
- Gravação a 30 fps, resolução de 1920 x 1080 pixels.

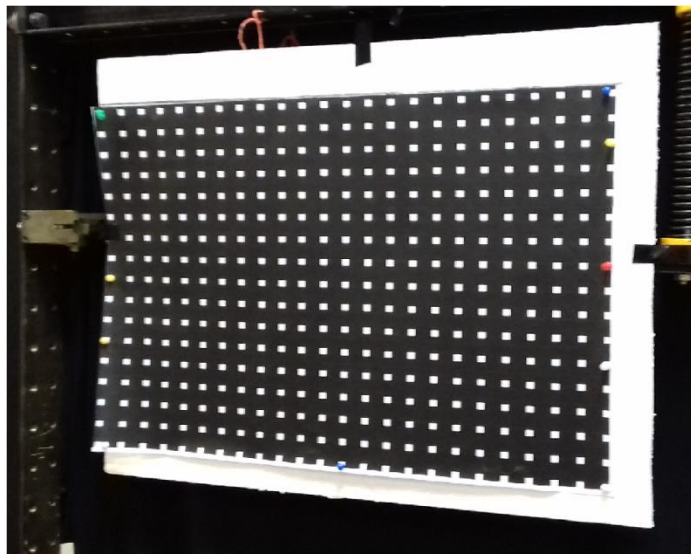
É importante ressaltar que a frequência fundamental das estruturas analisadas deva estar abaixo de 10 Hz. Isso por que, uma vez que nossa câmera só é capaz de gravar a 30 fps, ou seja, 30 medições por segundo ou 30 Hz. Pelo Critério de Nyquist, a frequência de vibração do sistema monitorado deve ser menor que metade deste valor (15 Hz) (PEDRINI; SHWARTZ, 2008). Entretanto, valores que atendem este critério, mas ainda estão próximos do valor limite não são desejados por fornecerem sinais de baixa resolução ("onda recortada").

Para o processamento das imagens foi usado um notebook ASPIRE, Memória de 6GB DDR3, processador Intel de 2.1GHz. Os algoritmos de processamento de imagem e do tratamento do sinal do acelerômetro.

4.3 MEDIÇÕES

As medições foram realizadas no Laboratório de Vibrações e Mecanismos da UTFPR-Campus Pato Branco. Foram feitas medições em quatro pontos diferentes da barra, espaçados de 100 mm. Para cada ponto um vídeo de aproximadamente 6 segundos foi gravado, e, ao mesmo tempo, a aceleração do ponto era medida com um acelerômetro.

Figura 14 – Quadro de calibração



Fonte: autoria própria.

Para determinação do fator de escala foi usando um padrão de quadrados brancos em fundo preto (Figura 14), cuja distância entre os centroides de cada quadrado é sabida por ser 25 mm, de modo que o fator de escala é de 0,30188 mm/pixel.

5 RESULTADOS

As Figuras 16,17,18 e 19 mostram os resultados dos sinais obtidos para os pontos P1, P2, P3 e P4 respectivamente, bem como seus espectros de frequência. Em todos os gráficos o intervalo de tempo analisado foi de 0 a 4,5 segundos. É possível observar graficamente que os dados de deslocamento oriundo da integração do sinal de aceleração do acelerômetro e o SSFD possuem concordância, a não ser pelo período que vai de 0 a 25 segundos. Esta janela onde o erro é consideravelmente maior pode ser explicada pelo maior nível de ruído que aparece no início do sinal de aceleração (logo após a aplicação da excitação), que pode interferir no processo de integração numérico mesmo se aplicando filtro.

Para termos uma base matemática de comparação entre os dois sinais, comparamos três parâmetros: os valores RMS dos sinais no domínio do tempo, a frequência natural do sistema dada pelo pico no espectro de frequência e o fator de amortecimento. A Figura 15 mostra o quadro com os valores calculados destes parâmetros para os quatro pontos avaliados.

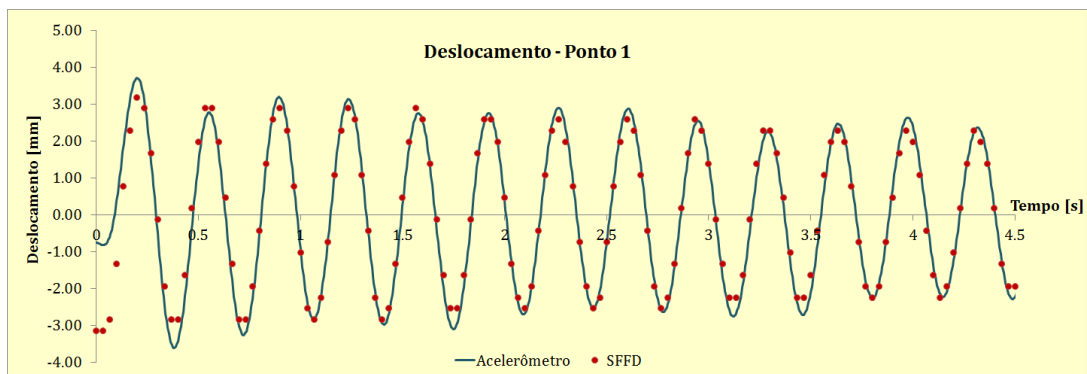
É possível observar que a frequência natural f foi o que teve menor desvio entre os dois métodos, e o fator de amortecimento ζ o que teve os maiores desvios. Também é importante notar que a amplitude do movimento não teve influencia significativa para aumentar ou diminuir a discrepância nos resultados.

Figura 15 – Quadro comparativo dos resultados dos quatro pontos analisados

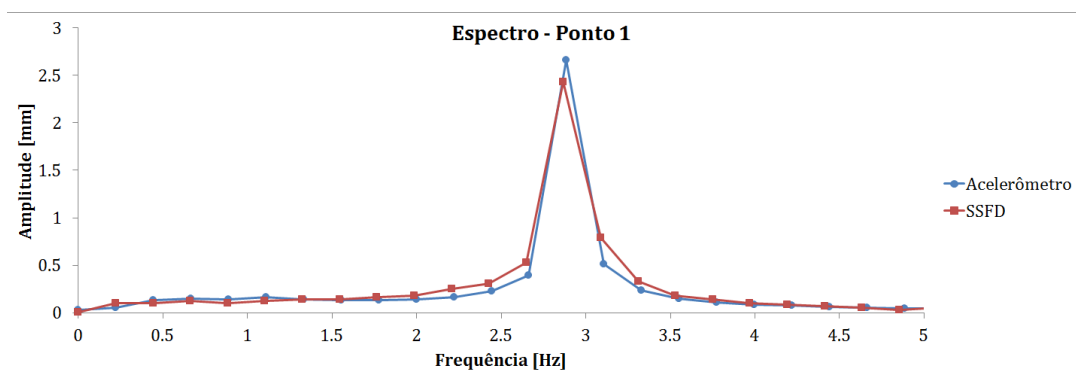
		RMS [mm ^{1/2}]	f [Hz]	ζ
P1	SSFD	1.91	2.87	3.67%
	Acelerômetro	1.98	2.89	2.72%
	<i>SSFD/Acel</i>	<i>0.966</i>	<i>0.994</i>	<i>1.35</i>
P2	SSFD	3.06	2.87	3.14%
	Acelerômetro	3.26	2.88	2.73%
	<i>SSFD/Acel</i>	<i>0.939</i>	<i>0.996</i>	<i>1.15</i>
P3	SSFD	3.50	2.87	3.48%
	Acelerômetro	3.48	2.89	2.84%
	<i>SSFD/Acel</i>	<i>1.01</i>	<i>0.992</i>	<i>1.23</i>
P4	SSFD	5.58	2.87	3.15%
	Acelerômetro	5.74	2.89	2.64%
	<i>SSFD/Acel</i>	<i>0.972</i>	<i>0.992</i>	<i>1.19</i>

Fonte: autoria própria.

Figura 16 – Resultados do Ponto 1 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência



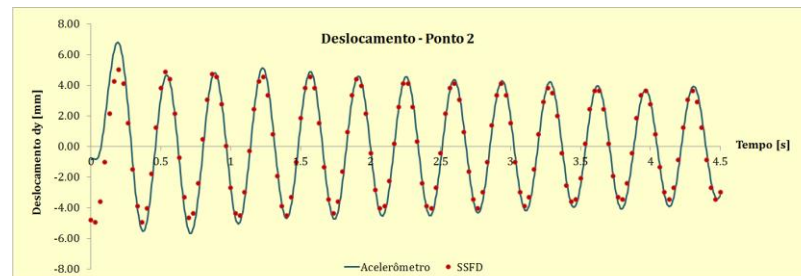
(a)



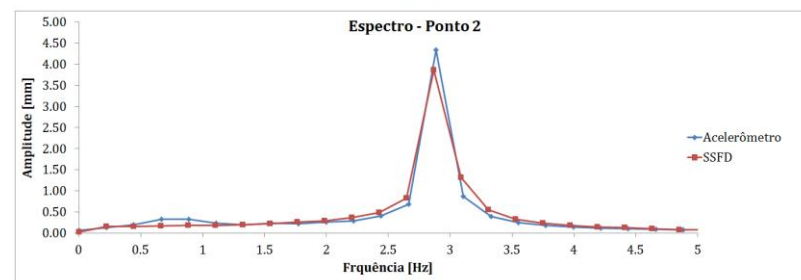
(b)

Fonte: autoria própria.

Figura 17 – Resultados do Ponto 2 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência



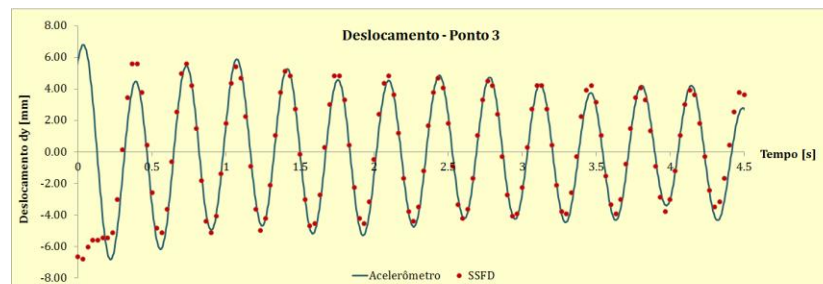
(a)



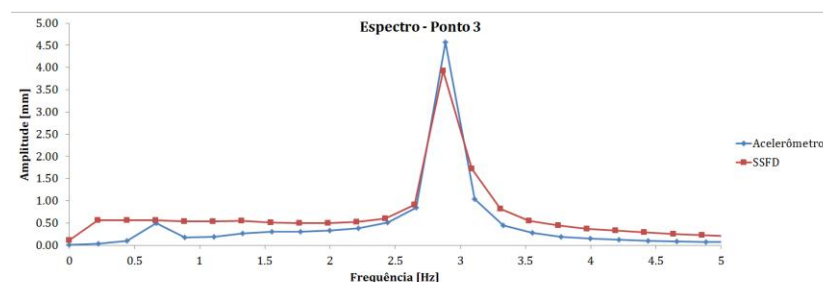
(b)

Fonte: autoria própria.

Figura 18 – Resultados do Ponto 3 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência



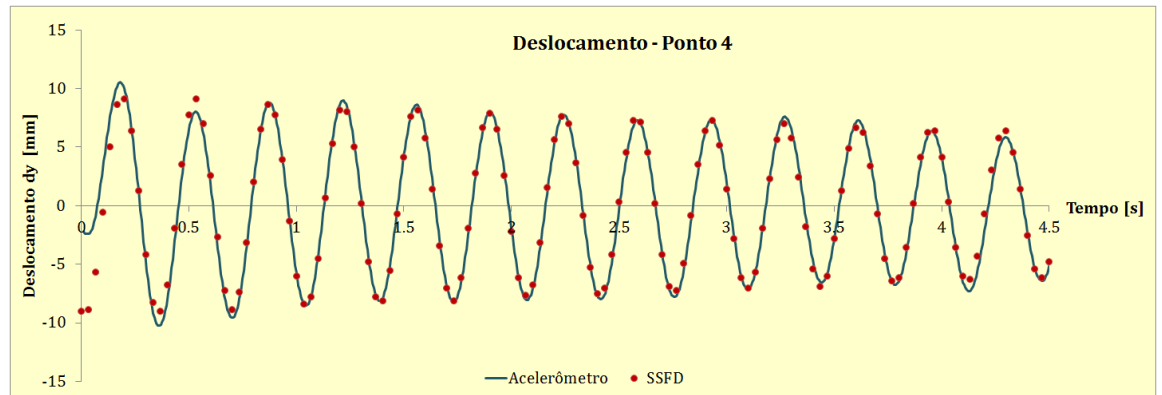
(a)



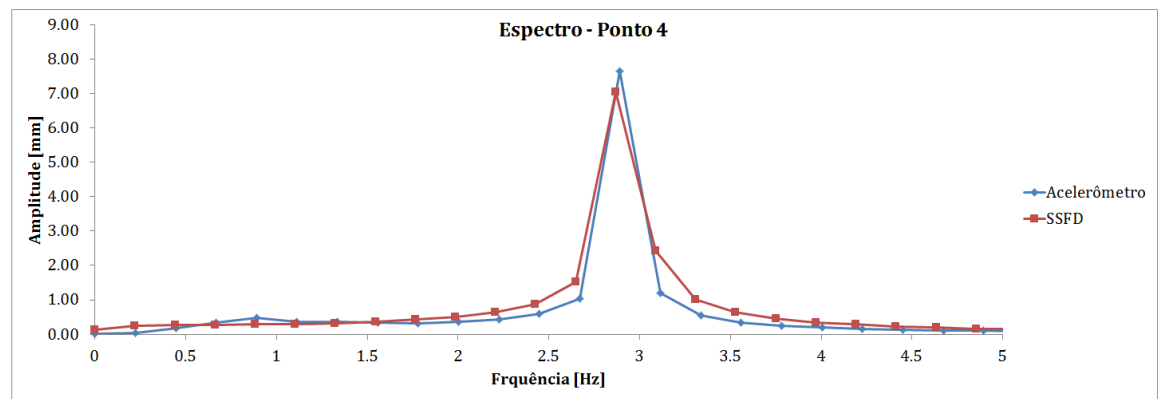
(b)

Fonte: autoria própria.

Figura 19 – Resultados do Ponto 4 sendo (a) no domínio do tempo e (b) domínio da frequência



(a)



(b)

Fonte: autoria própria.

6 CONCLUSÕES

A partir das medições feitas com o sistema baseado em fotogrametria digital, foi possível atestar sua eficácia na obtenção do sinal de deslocamento de um sistema de 1 Grau de Liberdade (GDL), uma vez comparado com a resposta obtida por um sensor tradicional. A partir do sinal de deslocamento, foi possível obter parâmetros a frequência natural e fator de amortecimento da estrutura, apesar da precisão da estimativa do primeiro ser consideravelmente maior que a do último. Este teste em laboratório é o ponto de partida para a expansão desta técnica para situações onde suas vantagens se fazem mais relevantes, em especial dois casos: (i) em medições de estruturas de grande proporções, onde o acesso e por consequência a instalação de sensores físicos como acelerômetros é não apenas trabalhosa, como perigosa e; (ii) no estudo de estruturas esbeltas de baixa inercia, onde a massa e rigidez dos sensores físicos causa uma interferência considerável nas medições.

Também é importante ressaltar que este sistema é uma alternativa mais barata que os métodos tradicionais, uma vez que os equipamentos necessários se resumem a uma câmera e um computador e, dependendo do algoritmo de correlação de imagens, alvos e/ou padrões (que podem ser feitos de papel). Isso é verdade para aplicações de baixas frequências, uma vez que câmeras comerciais geralmente possuem uma taxa de frequência em torno de 30 fps.

REFERÊNCIAS

BAQERSAD, Javad *et al.* Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v. 86, p.17-34, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.02.011>.

BARTILSON, Daniel T.; WIEGHAUS, Kyle T.; HURLEBAUS, Stefan. Target-less computer vision for traffic signal structure vibration studies. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v. 60-61, p.571-582, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.01.005>.

CHEN, Chien-chou *et al.* Application of digital photogrammetry techniques in identifying the mode shape ratios of stay cables with multiple camcorders. **Measurement**, [s.l.], v. 75, p.134-146, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.037>.

CHEN, Justin G. *et al.* Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. **Journal Of Sound And Vibration**, [s.l.], v. 345, p.58-71, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.01.024>

CUI, Lingli *et al.* Vibration response mechanism of faulty outer race rolling element bearings for quantitative analysis. **Journal Of Sound And Vibration**, [s.l.], v. 364, p.67-76, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.10.015>.

DEBELLA-GILO, Misganu; KÄÄB, Andreas. Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. **Remote Sensing Of Environment**, [s.l.], v. 115, n. 1, p.130-142, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.012>

EWINS, D.J. **Modal Testing**: Theory, Practice and Application. 2. ed. London: Research Studies Press, 2000. 562 p.

FENG, D.. **Advanced Vision-Based Displacement Sensors for Structural Health Monitoring**. 2016. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Columbia, Nova York, 2016.

FENG, Dongming; FENG, Maria Q.. Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring. **Structural Control And Health Monitoring**, [s.l.], v. 23, n. 5, p.876-890, 5 nov. 2015. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/stc.1819>

FENG, Zhipeng; MA, Haoqun; ZUO, Ming J.. Vibration signal models for fault diagnosis of planet bearings. **Journal Of Sound And Vibration**, [s.l.], v. 370, p.372-393, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.01.041>.

FRANCIS, D.; JAMES, S.; TATAM, R.p.. Surface strain measurement of rotating objects using pulsed laser shearography with coherent bre-optic imaging bundles. **Measurement Science And Technology**, S.l, v. 1, n. 19, p.1-13, 2008.

GIRDHAR, P.. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**. [s.l.]: Newnes, 2004.

HELFRICK, Mark N.; NIEZRECKI, Christopher; AVITABILE, Peter. Curvature methods of damage detection using digital image correlation. **Health Monitoring Of Structural And Biological Systems 2009**, [s.l.], p.1-12, 26 mar. 2009. SPIE. <http://dx.doi.org/10.1117/12.815511>.

HELFRICK, Mark N. *et al.* 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.917-927, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.08.013>

JURJO, D.I.b.r. *et al.* Experimental methodology for the dynamic analysis of slender structures based on digital image processing techniques. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v. 24, n. 5, p.1369-1382, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.12.006>.

KOHUT, P. *et al.* Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements. **Structural Health Monitoring**, [s.l.], v. 12, n. 5-6, p.411-429, 17 maio 2013. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921713487397>.

LEE, Hyoseong; RHEE, Huinam. 3-D measurement of structural vibration using digital close-range photogrammetry. **Sensors And Actuators A: Physical**, [s.l.], v. 196, p.63-69, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.03.010>.

LEE, J. J.; SHINOZUKA, M.. Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques. **Experimental Mechanics**, [s.l.], v. 46, n. 1, p.105-114, fev. 2006. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11340-006-6124-2>.

LIU, W.y. *et al.* The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 44, p.466-472, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.005>.

O'BYRNE, Michael *et al.* Acquisition and Analysis of Dynamic Responses of a Historic Pedestrian Bridge using Video Image Processing. **Journal Of Physics: Conference Series**, [s.l.], v. 628, p.2-9, 9 jul. 2015. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/628/1/012053>

OLASZEK, Piotr. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method. **Measurement**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.227-236, abr. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0263-2241\(99\)00006-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0263-2241(99)00006-8).

PATSIAS, S.; STASZEWSKIY, W. J.. Damage Detection Using Optical Measurements and Wavelets. **Structural Health Monitoring**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.5-22, 1 jul. 2002. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/147592170200100102>.

PEDRINI, Hélio; SCHWARTZ, William Robson. **Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações**. São Paulo: Thomson, 2008.

REU, Phillip L.; ROHE, Daniel P.; JACOBS, Laura D.. Comparison of DIC and LDV for practical vibration and modal measurements. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v.86, p.2-16, mar.2017.ElsevierBV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.02.006>.

SICARD, Jérôme; SIROHI, Jayant. Measurement of the deformation of an extremely flexible rotor blade using digital image correlation. **Measurement Science And Technology**, [s.l.], v. 24, n. 6, p.1-10, 14 maio 2013. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/24/6/065203>

SON, Ki-sung *et al.* Vibration displacement measurement technology for cylindrical structures using camera images. **Nuclear Engineering And Technology**, [s.l.], v. 47, n. 4, p.488-499, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2015.01.011>.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2011.

WAHBEH, A Mazen; CAFFREY, John P; MASRI, Sami F. A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems. **Smart Materials And Structures**, [s.l.], v. 12, n. 5, p.785-794, 25 set. 2003. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/12/5/016>.

WANG, Weizhuo; MOTTERSHEAD, John e; MARES, Cristinel. Vibration mode shape recognition using image processing. **Journal Of Sound And Vibration**, [s.l.], v. 326, n. 3-5, p.909-938, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2009.05.024>.

WU, Li-jun; CASCIATI, Fabio; CASCIATI, Sara. Dynamic testing of a laboratory model via vision-based sensing. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 60, p.113-125, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.12.002>

YOON, Hyungchul *et al.* Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras. **Structural Control And Health Monitoring**, [s.l.], v. 23, n. 12, p.1405-1416, 11 fev. 2016. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/stc.1850>.