



**XXVIII CREEM**

Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica  
Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

## **ANÁLISE MODAL OPERACIONAL COM ACELERÔMETROS DE BAIXO CUSTO VISANDO O MONITORAMENTO DA SAÚDE ESTRUTURAL**

**Lucas Ferreira da Silva, [lucasferreira@estudante.ufscar.br](mailto:lucasferreira@estudante.ufscar.br)<sup>1</sup>**

**Sidney Bruce Shiki, [bruce@ufscar.br](mailto:bruce@ufscar.br)<sup>1</sup>**

**Vitor Ramos Franco, [vrfranco@ufscar.br](mailto:vrfranco@ufscar.br)<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, 13565-905, Brasil,

**Resumo.** Ferramentas focadas em *Structural Health Monitoring* (SHM) são aplicadas em diversas áreas da Engenharia como meio de manter a integridade estrutural de sistemas civis, mecânicos, aeronáuticos, entre outros. Entretanto, para tal aplicação frequentemente são utilizados sensores de vibrações, bem como placas de aquisição que possuem um custo elevado, inviabilizando a adoção em massa dessa ferramenta. Como forma de viabilizar o uso do SHM, a utilização de sensores mais baratos está se tornando bem comum, sendo utilizados Sistemas Micro Eletro Mecânicos (MEMS, do inglês *micro electromechanical systems*). Em conjunto aos MEMS, utilizam-se hardwares com baixo custo para a captura e processamento de dados. Para o presente estudo, uma placa de prototipagem Arduino juntamente com acelerômetros de baixo custo (ADXL335) foram utilizados para o monitoramento de uma estrutura simplificada que representa um prédio de dois andares. A partir dos sinais medidos, aplicou-se a decomposição no domínio da frequência, visando extrair parâmetros modais da estrutura, como os modos naturais de vibração e as frequências de ressonância, aplicando-se assim uma análise modal operacional. Com os resultados, é possível avaliar a viabilidade de utilização de hardwares de baixo custo no monitoramento de estruturas mecânicas.

**Palavras chave:** Análise Modal Operacional. Frequências de ressonância. Modos de vibração. Decomposição do domínio da frequência. MEMS

**Abstract.** Tools focused on *Structural Health Monitoring* (SHM) are applied in several areas of engineering to maintain the structural integrity of civil, mechanical and aerospace systems. However, the components used for such application are usually vibration sensors, as well as acquisition boards with high cost, making the mass adoption of this tool unfeasible. As a way to enable the SHM's application, the use of cheaper sensors, as *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS), is becoming quite common. Together with MEMS, low cost hardware is used for data acquisition and processing. For the present study, an Arduino prototyping board together with low cost accelerometers (ADXL335) were used for the monitoring of a simplified structure representing a two-story building. With the measured signals, frequency domain decomposition (FDD) was applied, aiming to extract modal parameters of the structure, such as the natural vibration modes and resonance frequencies, thus applying an operational modal analysis. Based on the results, it will be possible to assess the feasibility of using low-cost hardware to monitor mechanical structures.

**Keywords:** operational modal analysis, resonance frequencies, natural vibration modes. Frequency Domain Decomposition. MEMS

### **1. INTRODUÇÃO**

Em termos gerais, danos podem ser definidos como alterações introduzidas a um sistema que afetam adversamente o desempenho atual ou futuro desse (Farrar and Worden, 2010). Implícito nesta definição, está o conceito de que o dano não é significativo sem uma comparação entre dois estados diferentes do sistema, sendo necessário representar o estado inicial, muitas vezes não danificado. Esta temática está focada no estudo da identificação de danos em sistemas estruturais e mecânicos

O processo de implementação de uma estratégia de identificação de danos é conhecido como *Structural Health Monitoring* (SHM). Esse processo envolve a observação de uma estrutura ou sistema mecânico ao longo do tempo usando medições espaçadas periodicamente, além da extração de recursos sensíveis a danos dessas medições e a análise estatística desses recursos para determinar o estado atual de integridade do sistema (Farrar and Worden, 2010). Diversas metodologias podem ser aplicadas para a implementação do SHM, sendo que no presente trabalho foi explorado o monitoramento baseado na análise de vibrações.

Segundo Rao (2017), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. A teoria de vibração trata-se do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles.

Relacionada ao SHM, as vibrações são uma das formas pela qual é possível avaliar a presença ou não do dano na estrutura de forma indireta, visto que o dano irá alterar as propriedades de rigidez, massa ou dissipação de energia de um sistema. Essas alterações costumam induzir modificações em propriedades dinâmicas do mesmo Farrar *et al.* (2001). Por esse motivo, é importante analisar os movimentos vibratórios do sistema com o intuito de avaliar as mudanças provocadas (ou não) pela presença do dano no sistema, sendo comum recorrer à técnicas de análise modal experimental.

A partir dessa contextualização, neste trabalho deu-se ênfase à aplicação da análise modal operacional, sendo essa um método de caracterização das propriedades dinâmicas de uma estrutura elástica através da identificação dos seus modos naturais de vibração a partir das suas condições de funcionamento (Machado, 2018). Visa-se realizar a caracterização dinâmica de uma estrutura, para uma futura aplicação em SHM. A análise modal permite extrair parâmetros que podem ser avaliados para detecção de danos. Esses parâmetros consistem nas frequências naturais de vibração do sistema e os modos naturais de vibração, que são os padrões geométricos de deslocamento do sistema associados à essas frequências (Rao, 2017).

Em análises modais, por questão de viabilidade, são utilizados sensores profissionais de vibrações, bem como placas de aquisição que possuem um custo elevado. No entanto a utilização de *hardwares* mais baratos está se tornando bem comum, sendo utilizados Sistemas Micro Eletro Mecânicos (*MEMS*, do inglês *micro electromechanical systems*). Em conjunto aos *MEMS*, utilizam-se *hardwares* com custo baixo para o processamento de dados. Dentre as possibilidades de uso em questão de processamento de dados, a placa Arduino é uma das mais comuns, visto que é de fácil operação até mesmo para pessoas não familiarizadas e com um custo baixo quando comparado a *hardwares* utilizados profissionalmente.

Por esse motivo, tem-se como proposta avaliar as limitações de *hardwares* de baixo custo para aplicações de análise modal operacional. Essa avaliação foi feita a partir da comparação do desempenho de acelerômetros *MEMS* de baixo custo com sensores/*hardware* profissionais usados para monitoramento de vibrações.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma geral, os *MEMS* são uma tecnologia que envolvem componentes mecânicos, eletrônicos e sensores em um pequeno chip, além de fornecerem capacidade de multiplicidade, o que permite a fabricação de um grande número de unidades idênticas ao mesmo tempo, mantendo assim o custo final do produto baixo (Judy, 2001).

Em exemplo a essa aplicação, Varanis *et al.* (2016) focou na obtenção de sinais e resultados a partir de um *hardware* de baixo custo, com o intuito de medir vibrações em sistemas mecânicos. Utilizou-se com esse objetivo a plataforma Arduino em conjunto com três tipos de sensores: acelerômetro, giroscópio e ultrassom.

Diferenciando-se em questão do módulo utilizado, sendo esse um módulo sem fio, o artigo de Sohn *et al.* (2015) obteve a partir da análise modal as frequências naturais e os modos de vibração referente a uma viga engastada. Esses parâmetros são obtidos através das medições da função de resposta em frequência. Para a obtenção desses sinais, é utilizado um módulo de medição de vibração sem fio de baixo custo, sendo aplicado em uma viga de aço, um módulo para aquisição de dados, um módulo de comunicação IEEE 802.15.4, um acelerômetro e um módulo para transmissão sem fio dos dados. Posteriormente, é feita uma comparação entre o acelerômetro cabeado e o acelerômetro sem fio.

Da mesma forma, seguindo uma proposta semelhante a anterior, Sivagami *et al.* (2020) procurou utilizar sensores para continuamente observar um edifício criado pelo autor (montado como bancada de teste) a partir de um sistema de alerta que busca prever danos através do Sistema Global para Comunicação móvel (GSM, do inglês *Global System for Mobiles*).

Para avaliação desse edifício, foram utilizados sensores e microcontroladores de baixo custo, como o acelerômetro ADXL335, utilizado para medição das vibrações geradas a partir de um impacto. Além do acelerômetro, um microcontrolador Arduino UNO é usado para coleta de dados provenientes dos sensores.

Por fim, aplicou-se o GSM já citado, com o propósito de enviar uma mensagem curta de cerca de 160 caracteres (7 bits) para o número do celular do proprietário. A partir de informações comuns sobre o limite permissível de vibração do solo, a informação do sensor é avaliada pela placa de prototipagem, e enviada um sinal pelo GSM indicando se há perigo ou não, ou seja, se o limite estabelecido foi ultrapassado.

## 3. DECOMPOSIÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (FDD)

Diante da execução de medições de sinais a partir da utilização de acelerômetros (mais sensíveis e de baixo custo), possibilita-se o processamento desses sinais para a identificação de parâmetros modais. Por esse motivo, o método *Frequency Domain Decomposition (FDD)* foi utilizado a fim de decompor vibrações medidas com os acelerômetros em diferentes posições da estrutura, de modo que parâmetros modais como frequências naturais e formas modais possam ser extraídos. Estes sinais obtidos foram utilizados para se calcular uma matriz de densidade espectral (Brincker and Ventura, 2015).

A FDD é um método não paramétrico que estima os parâmetros modais utilizando diretamente cálculos de processamento de sinais. Basicamente, o método utiliza a decomposição em valores singulares para decompor a matriz de densidade espectral das saídas do sistema em um conjunto de funções de densidade espectral de potência (PSD), cada uma correspondente a um sistema de grau de liberdade unitário (SDOF, do inglês *Single Degree-of-Freedom*), segundo

Brincker *et al.* (2001). O algoritmo calcula a densidade espectral de potência (PSD, do inglês *Power Density Spectral* -  $W_{x_n, x_n}$ ) e a densidade espectral cruzada (CPSD, do inglês *Cross Power Spectral Density* -  $W_{x_n, x_m}$ ) dos sinais de saída coletados em diferentes posições da estrutura. As PSDs e os CPSDs são reunidas na matriz PSD dos sinais de saída  $[W(\omega)]$ :

$$[W(\omega)] = \begin{bmatrix} W_{x_1, x_1}(\omega) & W_{x_1, x_2}(\omega) & \cdots & W_{x_1, x_N}(\omega) \\ W_{x_2, x_1}(\omega) & W_{x_2, x_2}(\omega) & \cdots & W_{x_2, x_N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{x_N, x_1}(\omega) & W_{x_N, x_2}(\omega) & \cdots & W_{x_N, x_N}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Após o cálculo de  $[W(\omega)]$ , a decomposição de valores singulares, do inglês *Singular value decomposition* (SVD) é feita para cada frequência  $\omega$ :

$$[W(\omega)] = [U][\Sigma][V]^T \quad (2)$$

em que  $[U]$  é uma matriz unitária  $N \times N$ ,  $[\Sigma]$  é uma matriz  $N \times N$  diagonal com os valores singulares e  $[V]^T$  é uma matriz  $N \times N$  com os vetores singulares.

Através da SVD, é possível traçar os primeiros valores singulares em função do domínio da frequência. Esses valores singulares são utilizados para identificar picos de amplitude que podem ser relacionados com as frequências de ressonância da estrutura analisado. Além, para as frequências de ressonância em questão, os vetores da matriz  $[V]^T$  são uma aproximação das formas dos modos de vibração do sistema. O funcionamento da FDD está ilustrada na Figura 1

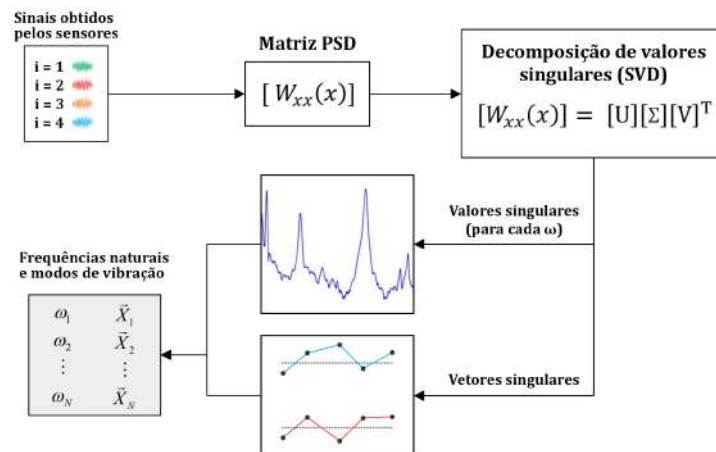


Figura 1. FDD ilustrada

#### 4. SETUP EXPERIMENTAL E ESTRUTURA DE TESTE

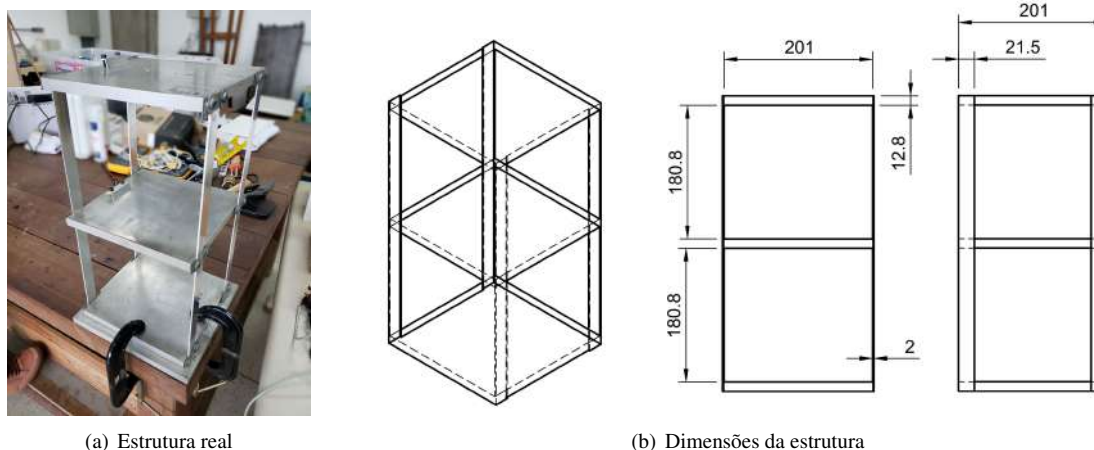
Para a execução da análise modal operacional, utilizou-se um modelo de sensor de vibração de baixo custo, além de uma placa de prototipagem rápida e os sensores profissionais para análise, como especificados abaixo:

- 2 acelerômetros triaxiais ADXL335 (sensibilidade: 300 mV/g, faixa de medição:  $\pm 3,6$  g de pico, faixa de frequência: até 1600 Hz);
- Placa de prototipagem Arduino UNO (6 pinos analógicos, resolução: 10 bits).
- Martelo de impacto PCB 086C03 (sensibilidade: 2,25 mV/N, faixa de medição:  $\pm 2224$  N de pico, ressonância:  $\geq 22$  kHz).
- 2 acelerômetros PCB 333B30 (sensibilidade: 100 mV/g, faixa de medição:  $\pm 50$ g de pico, faixa de frequência: 0,5 até 3000 Hz);
- Chassi cDAQ-9178 da National Instruments com módulo NI-9234 para medição de sensores IEPE (4 canais, amostragem: 51,2 kHz/canal, resolução: 24 bits);

Para os testes experimentais com os sensores, desenvolveu-se também uma estrutura simulando um prédio de dois andares com cada piso representado por uma placa de alumínio com dimensões de  $201 \times 201 \times 12,8$  mm. Os pisos foram

interligados por quatro vigas metálicas dobráveis de alumínio com  $180,8 \times 21,5 \times 2$  mm (vide figura 1(a)). Há também nessa Figura, a presença de setas vermelhas que indicam o posicionamento dos sensores (no centro dos pontos de fixação dos andares). As dimensões da estrutura estão explicitadas na Figura 1(b). O prédio é feito de alumínio com massa de 1,44kg.

Figura 2. Estrutura de representação de um prédio de dois andares



Dessa forma, os acelerômetros (tanto profissionais quanto de baixo custo) foram fixados aos dois andares do prédio, como ilustrado na Figura 3. Esses sensores foram conectados a um Arduino UNO para possibilitar a conversão do sinal analógico para digital. O Arduino foi conectado a um computador pessoal para a aquisição dos sinais de aceleração captados pelos acelerômetros. Para o tratamento dos dados adquiridos, utilizou-se o software Matlab R2020a. Na presente pesquisa, os dados obtidos pelo Arduino foram os mesmos capturados no artigo de Sidney Bruce Shiki (2020), enquanto os dados do sensor PCB333B30 foram extraídos pelo autor a partir de um ensaio de impacto.

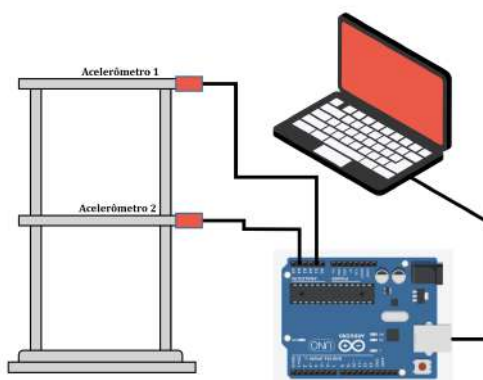


Figura 3. Estrutura do *setup* experimental

Durante os testes experimentais, aplicou-se uma excitação de impacto utilizando o martelo, com um tempo de medição da resposta de 30 segundos. Esse teste foi repetido durante 20 vezes para os sensores PCB333B30 e 8 vezes para o ADXL335 utilizados para a avaliação da repetibilidade dos dados. Por fim, os sinais de aceleração captados e adquiridos foram tratados a partir do algoritmo FDD para a extração dos parâmetros modais desejados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do método FDD nos dados adquiridos pelos acelerômetros PCB333B30 e ADXL335. Dessa forma, com os sinais de aceleração, o método FDD permitiu a obtenção das frequências de ressonância e dos modos de vibração da estrutura na condição *baseline* (condição sem presença de dano).

### 5.1 Aplicação do método FDD com os dados dos sensores PCB333B30 e ADXL335

A Figura 4 mostra a PSD gerada através dos dados obtidos pelo sensor PCB333B30 (cor vermelha), dando destaque aos picos, tendo em vista que esses representam os pontos de maior amplitude de vibração, em que no eixo horizontal, pode-se avaliar qual a frequência que remete a esse pico de amplitude (frequência de ressonância). A taxa de amostragem utilizada foi de 6400 Hz, no entanto, restringiu-se a visualização para os quatro primeiros modos presentes na estrutura (limitação até 250 Hz). Além disso, gerou-se também a PSD dos dados do ADXL335, em que a taxa de amostragem foi de 100 Hz, mostrada na mesma figura (na cor azul).

Diante das figuras apresentadas, vê-se um comportamento semelhante em relação aos picos evidenciados tanto na PSD do PCB333B30 quanto no ADXL335. Isso fica mais claro ao calcular as frequências de ressonância da estrutura utilizando ambos os dados. No entanto, visualizando-se os gráficos, nota-se a presença de uma frequência a mais próxima aos 10 Hz na curva do ADXL335. Para uma visualização mais clara, a Figura 4 mostra as PSDs combinadas de ambos os sensores.

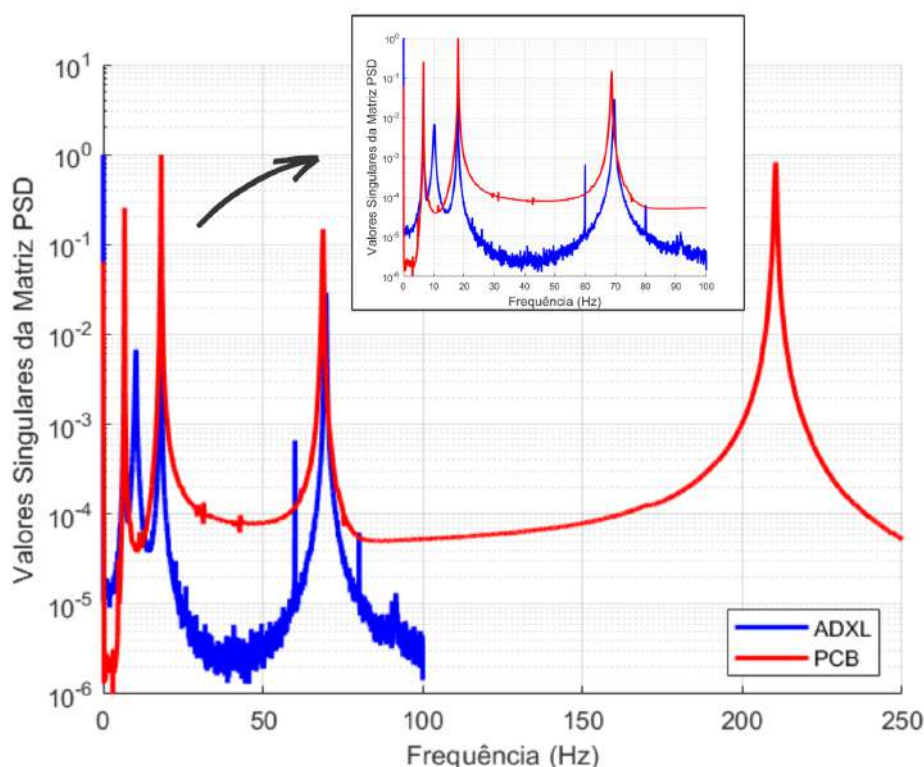


Figura 4. PSD obtida pelo PCB333B30 e ADXL335 sobrepostas para comparação

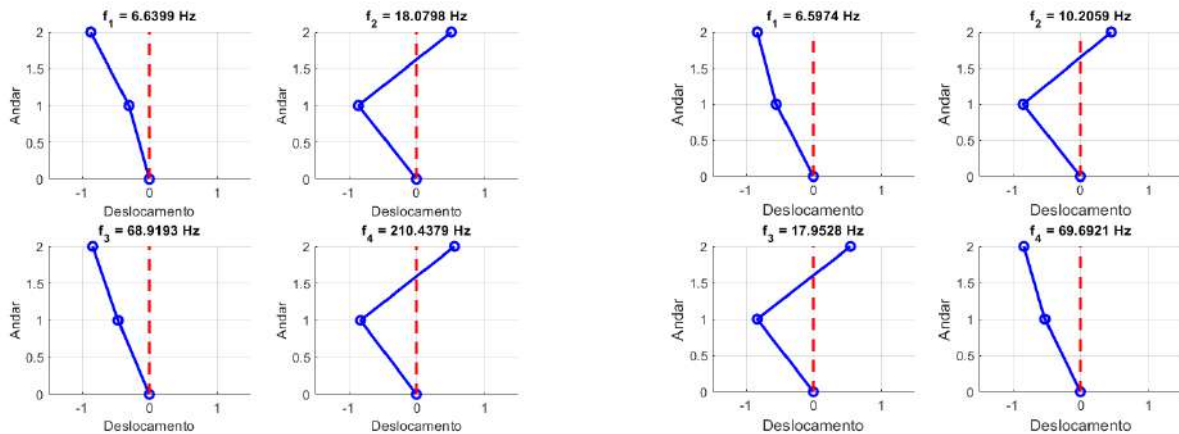
Novamente na Figura 4, fica clara a presença de um pico na curva do ADXL335, que não está presente na curva do outro sensor. Analisando melhor a figura estendida, avalia-se (pela curva da PCB333B30) que uma das frequências naturais da estrutura está próxima de 210 Hz. Tendo em vista que o Arduino não possui um filtro *anti-aliasing* aplicado durante a conversão do sinal analógico para digital, pode-se afirmar que a frequência natural próxima de 210 Hz (que está fora da taxa de amostragem) está sendo captada pelo Arduino e sendo reconhecida como 10 Hz, o que implica em um novo pico presente no gráfico da PSD.

Além das frequências de ressonância, calculou-se também os modos de vibração da estrutura para cada frequência encontrada. Na Figura 5(a) e 5(b), têm-se os quatro primeiros modos de vibração, juntamente com as frequências naturais, referente a condição *baseline*. Comparando ambas as figuras, nota-se a equivalência entre os resultados obtidos por ambos os sensores, tendo em vista que os valores dos modos 1, 2 e 3 da PCB333B30 são próximos dos valores dos modos 1, 3 e 4 do ADXL335, respectivamente.

Além disso, os modos de vibração dessas mesmas frequências possuem um comportamento equivalente em uma avaliação unilateral, tendo em vista que mede-se a translação horizontal (em termos de aceleração) da viga. Ressalta-se também que o comportamento do modo de 210.4379 Hz apresenta semelhanças ao modo de 10.2059 Hz, comprovando a existência do efeito de *aliasing* propiciado pelo Arduino.



Figura 5. Primeiros quatro modos de vibração



(a) Primeiros quatro modos de vibração da condição *baseline* pela PCB333B30

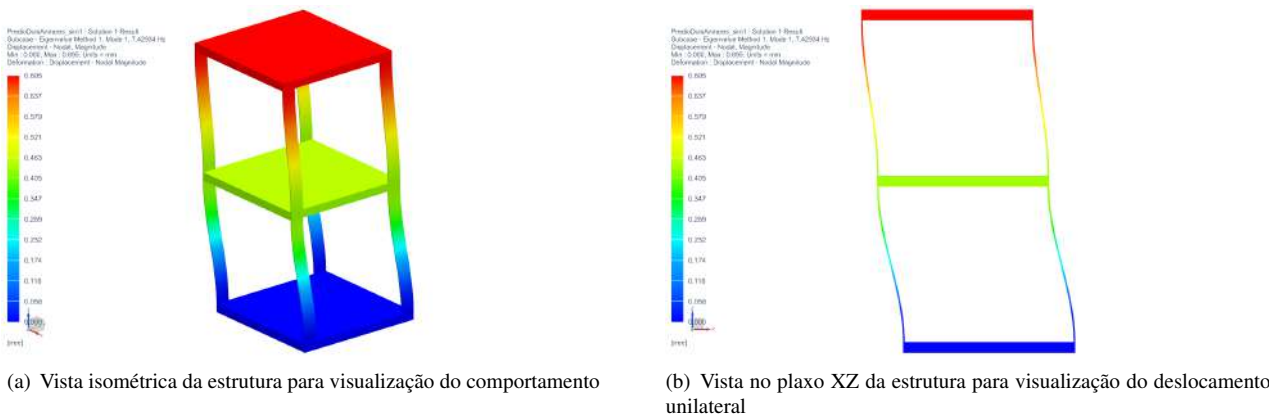
(b) Primeiros quatro modos de vibração da condição *baseline* pelo ADXL335

Ressalta-se que na Figura 5, os pontos de posicionamentos no andar 1 e 2 são equivalente a localização dos sensores na estrutura, dessa forma implica que os gráficos mostram o deslocamento daquele ponto da estrutura em relação a condição inicial (com deslocamento 0). Ressalta-se também que mesmo com características semelhantes entre alguns, cada modo difere-se em relação a outro, e a partir da estimativa fornecida pela FDD, não é possível avaliar o tipo de modo de vibração sofrido pela estrutura em uma determinada frequência, tendo em vista que a perspectiva visualizada não apresenta uma visão tridimensional da estrutura.

## 5.2 Utilização do método de elementos finitos para verificação dos modos de vibração

Como meio a identificar o comportamentos dos modos em uma visão tridimensional, é possível a modelagem da estrutura analisada em um sistema CAD e a realização de uma simulação computacional por meio do método de elementos finitos (FEM, do inglês *Finite Element Method*). Para isso, utilizou-se o software Siemens NX 12.0 para a criação da modelagem CAD e a posterior análise modal por meio do FEM. Ressalta-se que a estrutura foi engastada na região inferior, na base do prédio, como ocorre na estrutura real. A malha da estrutura foi modelada com dimensões de elemento de 5mm, com o material alumínio (idêntico a estrutura real).

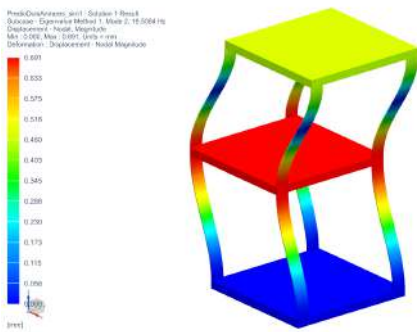
Figura 6. 1º modo de vibração



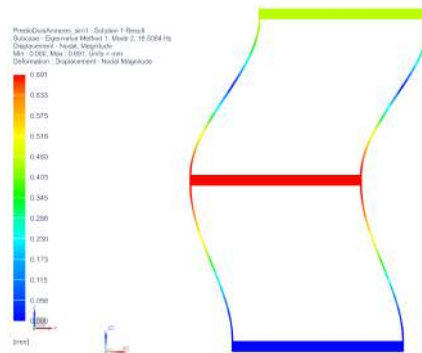
(a) Vista isométrica da estrutura para visualização do comportamento

(b) Vista no plano XZ da estrutura para visualização do deslocamento unilateral

Figura 7. 2º modo de vibração

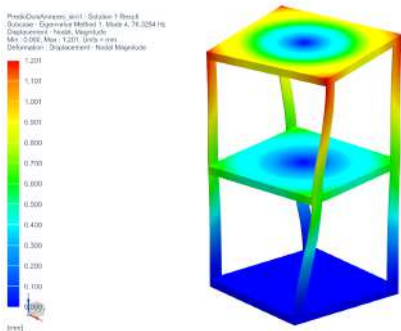


(a) Vista isométrica da estrutura para visualização do comportamento

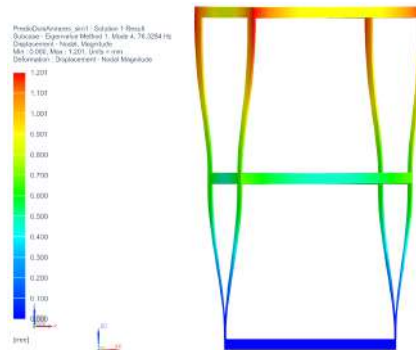


(b) Vista no plano XZ da estrutura para visualização do deslocamento unilateral

Figura 8. 3º modo de vibração

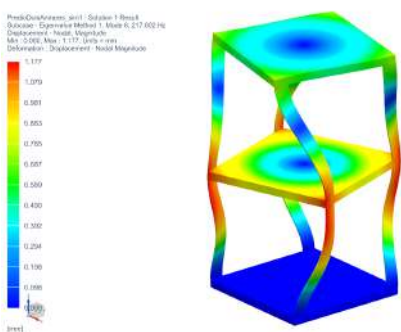


(a) Vista isométrica da estrutura para visualização do comportamento

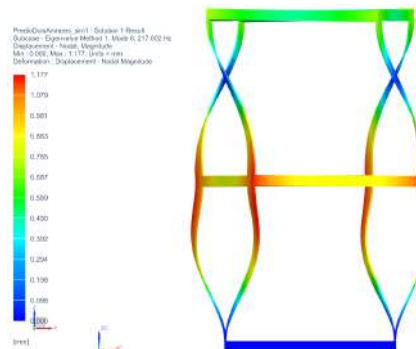


(b) Vista no plano XZ da estrutura para visualização do deslocamento unilateral

Figura 9. 4º modo de vibração



(a) Vista isométrica da estrutura para visualização do comportamento



(b) Vista no plano XZ da estrutura para visualização do deslocamento unilateral

Partindo das Figuras 6, 7, 8 e 9, é possível a visualização dos modos de vibração da estrutura. Para o 1º modo, têm-se um modo de flexão em fase. O 2º modo consiste em modo de flexão fora de fase. Já o 3º e 4º modo são modos de torção. Essa visualização não é possível a partir do método FDD, tendo em vista que os sensores captam apenas uma direção de deslocamento. Por esse motivo, o FEM torna-se uma ferramenta útil para compreensão desses modos. Além disso, ressalta-se que as frequências de ressonância obtidas pelo FEM são próximas as frequências obtidas pelos sensores, validando a aplicação do método FDD e a aplicação dos sensores de baixo custo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, estimou-se a partir do método FDD as frequências de ressonância e os modos de vibração da estrutura que representa um prédio de dois andares. O método foi aplicado a partir dos dados obtidos por dois tipos de acelerômetros PCB333B30 e ADXL335. Essa estimativa teve como objetivo a comparação entre ambos os sensores, tendo como perspectiva avaliar a aplicabilidade do ADXL335 para a análise modal operacional.

Partindo do que foi citado anteriormente, possibilitou-se a avaliação de ambos os sensores em conjunto, buscando compreender as limitações dos sensores de baixo custo. Pode-se notar que esses sensores são capazes de estabelecer valores de frequência e modos condizentes com os valores dos sensores PCB333B30, porém com uma ressalva. Essa ressalva consiste na possibilidade de utilização de um filtro *anti-aliasing* para que não haja a presença no intervalo analisado de uma frequência fora da faixa de amostragem. Além disso, é possível ampliar a faixa de amostragem dos sensores de baixo custo para avaliação das mudanças geradas.

## 7. AGRADECIMENTOS

O autor agradece à FAPESP, Processo nº2021/04678-8 2020/05973-0, pelo apoio financeiro e institucional e aos docentes orientador e co-orientador, que tornaram possível a realização deste estudo.

## 8. REFERÊNCIAS

- Brincker, R. and Ventura, C., 2015. *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons.
- Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P., 2001. "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition". *Smart materials and structures*, Vol. 10, No. 3, p. 441.
- Farrar, C.R., Doebling, S.W. and Nix, D.A., 2001. "Vibration-based structural damage identification". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 359, No. 1778, pp. 131–149.
- Farrar, C.R. and Worden, K., 2010. "An introduction to structural health monitoring". *New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring*, pp. 1–17.
- Judy, J.W., 2001. "Microelectromechanical systems (mems): fabrication, design and applications". *Smart materials and Structures*, Vol. 10, No. 6, p. 1115.
- Machado, R.R.M., 2018. "Identificação por análise modal operacional: Algoritmo de abordagem clássica no domínio da frequência".
- Rao, S., 2017. *Mechanical Vibrations*. Pearson Education, Incorporated. ISBN 9780134361307. URL <https://books.google.com.br/books?id=t6gHswEACAAJ>.
- Sidney Bruce Shiki, V.R.F., 2020. "Application of low-cost instrumentation and output-only modal identification techniques for the structural health monitoring of mechanical systems". In *CILAMCE 2020 Proceedings of the XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC*. CILAMCE, pp. 1–7.
- Sivagami, A., Jayakumar, S. and Kandavalli, M.A., 2020. "Structural health monitoring using smart sensors". *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2281, No. 1, p. 020034. doi:10.1063/5.0026292.
- Sohn, S., Rim, S. and Lee, I., 2015. "Vibration measurement of wireless sensor nodes for structural health monitoring". *Advanced Science and Technology Letters*, Vol. 98, No. 1.
- Varanis, M., Silva, A.L., Brunetto, P.H.A. and Gregolin, R.F., 2016. "Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the arduino platform". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 38, No. 1.

## 9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.