

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

**MATHEUS PIMENTEL GOBBO**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA PROJETOS DE ABSORVEDORES  
DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2019**

MATHEUS PIMENTEL GOBBO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA PROJETOS DE  
ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Departamento Acadêmico de 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. GIOVANNI BRATTI

PATO BRANCO

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Desenvolvimento de uma Bancada Didática Para Projetos de Absorvedores  
Dinâmicos de Vibração

Matheus Pimentel Gobbo

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 28/11/2019 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 - Câmpus 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. Paulo Rogerio Novak  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Giovanni Bratti  
(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

## RESUMO

GOBBO, MATHEUS PIMENTEL. Desenvolvimento de uma bancada didática para projetos de absorvedores dinâmicos de vibração. 2019. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

O presente trabalho constitui-se no desenvolvimento de uma bancada didática, que possibilite a simulação de um terremoto ou uma excitação pela base de um determinado objeto. Foram relatados todos os passos da construção, desde da parte do projeto até parte construtiva. Após a construção, foram realizados experimentos em um protótipo de um prédio construído em bambu, com intuito de analisar os modos de vibração de flexão de cada frequência natural e comparar com os modos de vibração obtidos por simulação no programa Ansys. O trabalho estudou e aplicou absorvedores dinâmicos de vibração, para diminuir as amplitudes de vibração nas frequências que se encontra os pontos que ocorrem ressonância do protótipo. Os principais resultados foram, identificação das frequências naturais que acarretam ressonância, diminuição significativa da vibração ocasionada pelo abalo sísmico e obtenção de vídeos e imagens dos quatro modos de vibração de flexão.

**Palavras-chave:** Bancada Didática. Modos de Vibração. Análise Modal. Absorvedores Dinâmicos de Vibração (ADV). Prevenção de Abalos Sísmicos.

## ABSTRACT

GOBBO, MATHEUS PIMENTEL. Development of a didactic bench for dynamic vibration absorber projects. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

The present work is the development of a didactic workbench, which allows the simulation of an earthquake or an excitation by the base of a certain object. All steps of construction, from the project part to the construction part, were reported. After construction, experiments were performed in a building prototype built in bamboo, to analyze the flexural vibration modes of each natural frequency and compare with the vibration modes obtained by simulation in the Ansys program. The work studied and applied dynamic vibration absorbers, to decrease the vibration amplitudes in the frequencies that meet the prototype resonance points. The main results were: identification of the natural frequencies that cause resonance, significant reduction of vibration caused by the seismic shaking and obtaining videos and images of the four flexion vibration modes.

**Keywords:** Didactic bench. Vibration Modes. Modal analysis. Dynamic Vibration Absorbers (DVAs). Seismic Shake Prevention.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Placas tectônicas .....   | 16 |
| Figura 2 – Movimentos de partículas produzidos pelos diferentes tipos de ondas planas..... | 17 |
| Figura 3 - Localização geográfica do hipocentro e epicentro de um sismo .....              | 18 |
| Figura 4 - Ordem de grandeza da magnitude dos terremotos.....                              | 19 |
| Figura 5 - Piores terremotos da história .....   | 20 |
| Figura 6 -Sismicidade da América do Sul .....  | 21 |
| Figura 7 - Piores abalos sísmicos no Brasil .....  | 22 |
| Figura 8 - Representação dos modos de vibração de um edifício de três pavimentos .....     | 23 |
| Figura 9 - Representação esquemática do teste de impacto .....                             | 24 |
| Figura 10 - Sistema acoplado com ADV não amortecido.....                                   | 25 |
| Figura 11 - FRF da massa primária para $\mu=0,10$ e $\beta=1$ .....                        | 27 |
| Figura 12 - Desenho esquemático do sistema primário e ADV com amortecedores                | 28 |
| Figura 13 – FRF da massa primaria com $\mu=0.25$ e $\beta=1$ .....                         | 30 |
| Figura 14 - Pêndulo.....   | 31 |
| Figura 15 - Bancada Didática com Balões de Componentes Numerados.....                      | 32 |
| Figura 16 – Chapa de Fixação do Protótipo.....   | 34 |
| Figura 17 – Sistema Biela manivela .....   | 35 |
| Figura 18 - Chapa de MDF.....  | 36 |
| Figura 19 - Bancada fixa na base de sustentação. ....                                      | 37 |
| Figura 20 - Sistema de movimentação da bancada. ....                                       | 37 |
| Figura 21 - Protótipo de um prédio.....  | 38 |
| Figura 22 – Furos nas tabuas de itaúba .....   | 39 |
| Figura 23 – Desenho 2D do protótipo com a numeração dos pavimentos.....                    | 39 |
| Figura 24 - Pêndulos .....   | 40 |
| Figura 25 - Analisador de sinais .....   | 41 |
| Figura 26 - Protótipo com os acelerômetros.....  | 42 |
| Figura 27 - Analisador de sinais .....   | 42 |
| Figura 28 - Gráfico FRF sem ADV .....  | 44 |
| Figura 29 – Comparação do primeiro modo de vibração (a) simulação e (b) experimento.....   | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 30 - Comparação do segundo modo de vibração (a) simulação e (b) experimento.....            | 46 |
| Figura 31 - Comparação do terceiro modo de vibração (a) simulação e (b) experimento.....           | 47 |
| Figura 32 - Comparação do quarto modo de vibração (a) simulação e (b) experimento.....             | 48 |
| Figura 33 – Gráfico de comparação da FRF do protótipo com o pêndulo 1 e sem o pêndulo .....        | 49 |
| Figura 34 - Amplitude em função do tempo do protótipo com o pêndulo 1 e sem o pêndulo .....        | 50 |
| Figura 35 - Gráfico de comparação da FRF do protótipo com os dois pêndulos e sem os pêndulos ..... | 51 |
| Figura 36 - Amplitude em função do tempo do protótipo com os dois pêndulos e sem os pêndulos ..... | 52 |
| Figura 37 - Gráfico de comparação da FRF do protótipo dos dois experimentos .....                  | 53 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Lista dos Componentes da Bancada Didática.....                              | 33 |
| Tabela 2 – Valores dos modos de vibração de flexão.....                                | 45 |
| Tabela 3 – Dados do experimento com pêndulo 1.....                                     | 49 |
| Tabela 4 - Dados do experimento com o pêndulo 1 e o pêndulo 2 simultaneamente<br>..... | 51 |



## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|            |  |               |
|------------|--|---------------|
| ADV        | Absorvedor dinâmico de vibração        | -             |
| M          | Magnitude do terremoto                 | -             |
| A          | Amplitude máxima de onda Rayleigh      | $\mu\text{m}$ |
| $\Delta$   | Distância do epicentro em graus        | $^{\circ}$    |
| $a_{xy}$   | Deslocamentos dos pavimentos           | mm            |
| $x$        | Deslocamento do sistema principal      | m             |
| $x_a$      | Deslocamento do sistema do ADV         | m             |
| $k$        | Rigidez do sistema primário            | N/m           |
| $k_a$      | Rigidez do sistema do ADV              | N/m           |
| $m$        | Massa do sistema primário              | Kg            |
| $m_a$      | Massa do sistema do ADV                | Kg            |
| $\mu$      | Razão de massas                        | -             |
| $\omega$   | Frequência natural                     | Hz            |
| $\omega_p$ | Frequência natural do sistema primário | Hz            |
| $\omega_a$ | Frequência naturais do sistema do ADV  | Hz            |
| $\beta$    | Fator de Sintonização                  | -             |
| $r$        | Frequência de excitação normalizada    | -             |
| FRF        | Função de resposta em Frequência       | N.s/m         |
| $c$        | Constante de amortecimento             | N.s/m         |
| $c_a$      | Constante de amortecimento do ADV      | -             |
| $\zeta$    | Fator de amortecimento                 | -             |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 12 |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 13 |
| 1.2.1 Objetivo Principal .....  | 13 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos .....   | 13 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA .....   | 13 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....   | 14 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....   | 15 |
| 2.1 TERREMOTOS .....  | 15 |
| 2.1.3 Classificação dos Terremotos .....                                      | 17 |
| 2.1.4 Os piores terremotos registrados no mundo .....                         | 20 |
| 2.1.5 Os Piores Terremotos Registrados no Brasil .....                        | 21 |
| 2.2 ANALISE MODAL .....   | 22 |
| 2.2.1 Modos de Vibração .....   | 22 |
| 2.3.2 Testes de impacto .....   | 23 |
| 2.4 ABSORVEDORES DINÂMICOS .....  | 24 |
| 2.4.1 Absorvedores Dinâmicos de Vibração (ADV) Sem Amortecimento. ....        | 24 |
| 2.4.1.1 Pêndulo .....   | 31 |
| 3 METODOLOGIA.....  | 32 |
| 3.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA .....  | 33 |
| 3.1.2 Sistema de Movimentação .....   | 37 |
| 3.2 PROTÓTIPO DO PRÉDIO .....   | 38 |
| 3.3 DESENVOLVIMENTO CONSTRUTIVO ABSORVEDOR DINÂMICO DE<br>VIBRAÇÃO (ADV)..... | 40 |
| 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....  | 41 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....   | 44 |
| 4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS DO PROTÓTIPO .....                                   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2 MODOS DE VIBRAÇÕES .....   | 45 |
| 4.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÃO (ADV) .....   | 48 |
| 4.3.1 ADV Com o Pêndulo 1 .....  | 49 |
| 4.3.2 ADV Com o Pêndulo 1 e Pêndulo 2 Simultaneamente. ....                  | 51 |
| 4.3 .3 Comparação de Resultados dos ADVs em Relação da Razão das Massas...53 |    |
| 5 CONCLUSÕES .....   | 55 |
| 5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....                                       | 56 |
| REFERÊNCIAS .....  | 57 |

## 1 INTRODUÇÃO

Terremotos, sismos ou abalos sísmicos são eventos de alta liberação de energia, os quais ocasionam tremores bruscos na superfície da Terra. Desses eventos, podemos notar enormes danos causados para sociedade como a perda de bens materiais, destruição de cidades e principalmente perda de vidas humanas.

Para se ter uma magnitude destes eventos, demonstraremos em forma de números dos últimos grandes episódios de abalos sísmicos ocorridos. Primeiramente, iremos comentar sobre o terremoto incidido no Haiti no ano de 2010 que atingiu a magnitude 7 da escala Richter, o qual causou um prejuízo estimado em torno de 14 bilhões de dólares e mais de 200 mil vidas perdidas neste triste episódio.

Não é apenas em países subdesenvolvidos que terremotos geram números tão expressivos. No ano de 2011, um terremoto atingiu a costa do Japão e deixou cerca de 14 mil mortes e mais de 2 mil desaparecidos, além de causar um prejuízo na economia local estimado em torno de 22,2 bilhões de dólares.

Com estes dados alarmantes, podemos afirmar que a compressão dos abalos sísmicos, assim como os desenvolvimentos técnicos e equipamentos para controle, é de extrema importância para a sociedade global. E se quisermos evoluir para um mundo mais seguro, teremos que aumentar o nosso conhecimento sobre eventos ocasionados pela natureza, como os terremotos.

E com isso, esse trabalho possui o foco de compreender e minimizar vibração de um protótipo, do qual se assemelha muito com modos de construções civis aplicadas nos dias de hoje, pois sabemos que grande parte das vítimas de abalos sísmicos é provida de desmoronamentos de construções.

Iremos utilizar análise modal para compreender as vibrações provocadas intencionalmente no protótipo, após isso iremos utilizar absorvedores dinâmicos de vibração (ADV) para minimizar a amplitude da vibração ocasionado pelas frequências naturais da estrutura. Pois sabe-se que excitação de um corpo em suas frequências naturais ocasionam uma maior amplitude de sua vibração, e assim acaba gerando falhas catastróficas.

Após o desenvolvimento da bancada didática e seus resultados, a estrutura será deixada na forma de bancada didática na instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Pato Branco, para uso na disciplina de vibração mecânica, mais especificamente para que os acadêmicos possam vir a ter um melhor

entendimento nas áreas de absorvedores dinâmicos, modos de vibração e análise modal.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Principal

Desenvolver uma bancada didática e aplicar conceitos e técnicas adquiridas na disciplina de vibração mecânica, mais especificamente na área de absorvedores dinâmicos de vibração, análise modal e modos de vibração.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de cumprir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são desenvolvidos:

- 1- Desenvolver uma base móvel, para fixação do protótipo de um prédio com excitação de vibração controlada;
- 2- Realizar uma análise modal experimental, para identificação dos parâmetros de aplicação do ADV e dos modos vibrações;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Devido aos grandes números de acidentes, que normalmente deixam várias vítimas e sociedades destruídas, a prevenção de terremotos deve ser um assunto cada vez mais estudado. Com intuito de minimizar essas catástrofes, esse trabalho vem explicar e aplicar técnicas preventivas.

Além da questão do terremoto, esse trabalho contribui também, para futuras teses e pesquisas relacionada a ADV e análise modal. As quais são áreas com grande potencial na engenharia, devido suas aplicações serem amplas e com resultados bem expressivos.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco relevantes áreas para entendimento do estudo realizado. Na primeira seção está contida a introdução do trabalho, bem como a motivação para o presente estudo, os objetivos gerais e específicos. Aqui é feita a apresentação do problema e é possível tomar conhecimento de informações relevantes para a execução do trabalho.

Na segunda seção encontra-se a revisão bibliográfica referente ao assunto abordado ao longo do trabalho.

Na terceira seção pode-se observar a metodologia utilizada para desempenhar o estudo vigente, evidenciando a construção da bancada didática e os métodos de obtenção dos resultados.

Na quarta seção estão contidos os resultados referentes aos experimentos desenvolvidos neste projeto.

Na quinta e última seção encontram-se as conclusões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TERREMOTOS

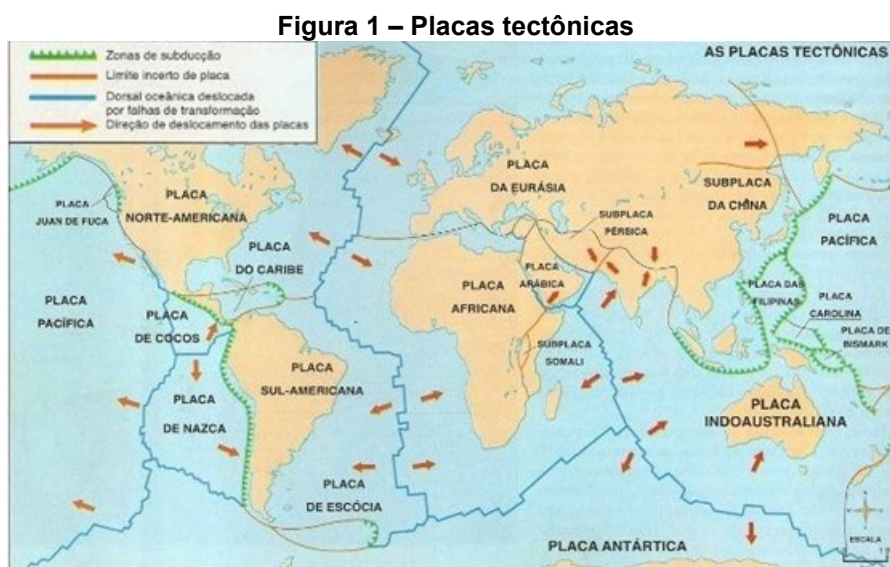
Os terremotos ou abalos sísmicos, são ocasionados quando a magnitude vibratória atinge um determinado patamar na escala Richter. Terremotos são tremores de terra causados pela liberação de energia através de ondas elásticas que se propagam pela Terra. Com um enorme poder destrutivo em questões de perdas materiais e de vidas humanas, os terremotos são amplamente estudados porque causam inúmeras vítimas em todo o planeta devido à imprecisão de parâmetros como intensidade, local e período de ocorrência.

Segundo Santos (2014), terremotos podem originar-se devido a três processos geológicos, são eles: causas tectônicas, vulcânicas e desmoronamentos internos superficiais. Entretanto, podem haver terremotos induzidos, que são causados pelo homem, os quais podem ser gerados por meio de escavações como mineração e petróleo.

Neste estudo, é basear em terremotos originados de causas tectônicas. Normalmente são os que apresentam maiores danos e também os mais frequentes encontrados. Sua funcionalidade é explicada no excerto abaixo:

Os movimentos das placas tectônicas podem causar afastamento, colisão, ou deslizamento de uma placa pela outra. Havendo impedimento de deslocamento na interface entre as placas, a energia de deformação vai se acumulando até superar a resistência da rocha, que se deslocará no momento da ruptura. Ocorre neste momento uma grande liberação de energia até que as placas atinjam uma nova posição de equilíbrio. Essa energia liberada subitamente se propaga por meio de ondas de deformação que geram deslocamentos da superfície podendo causar destruição. (PARISENTI, 2011, p.23).

A Figura 1, demonstra as placas tectônicas e seus sentidos de propagação dos abalos sísmicos no mundo.



Fonte: <https://www.coladaweb.com/geografia/placas-tectonicas>  
 Autor: Renan Bardine

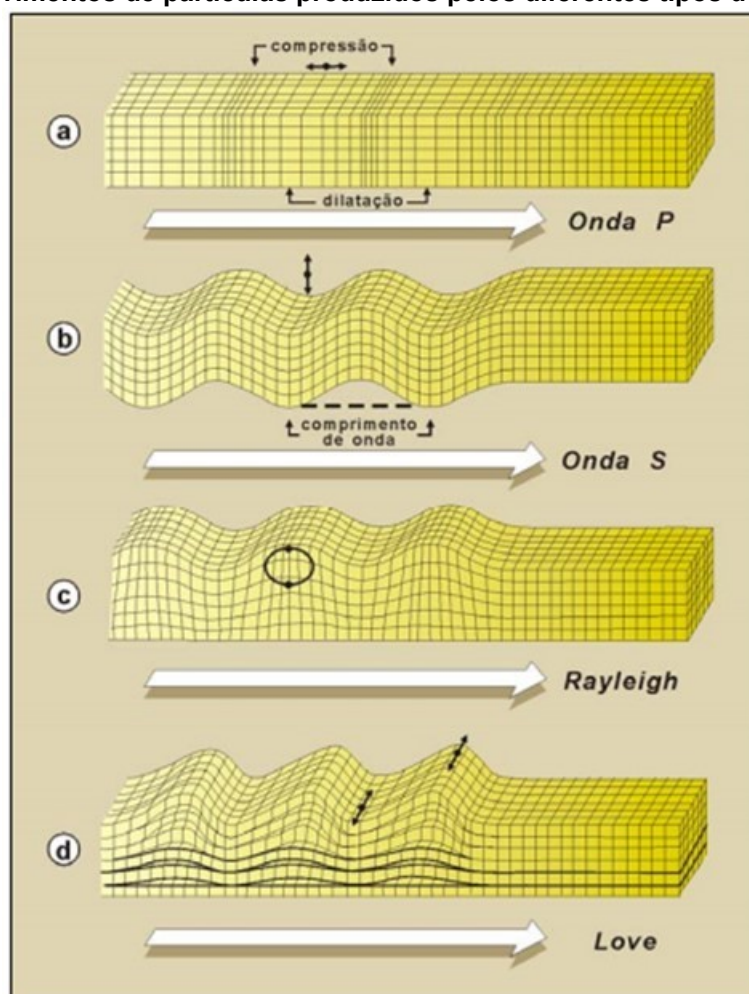
A maneira como as ondas se propagam em um terremoto podem ser representadas por dois grupos. As ondas de corpo, que são formadas pelas dilatantes ondas P, e também as ondas de cisalhamento ondas S (PARISENTI, 2011).

- Ondas do tipo P (Primárias): elas se propagam em movimentos de compressão e dilatação, na direção de propagação. Elas possuem características de ser mais rápidas que as secundárias (PARISENTI, 2011);
- Ondas do tipo S (Secundárias): elas se propagam em movimentos ondulatórios, para cima e para baixo, assim causando deformação por cisalhamento (PARISENTI, 2011).

Já o segundo grupo é composto por ondas superfícies, as de Rayleigh e as de Love, elas são as interações das ondas P e S, que apresentam elevado poder de destruição e menor velocidade de deslocamento, sendo assim mais fáceis de serem detectadas (PARISENTI, 2011).



Figura 2 - Movimentos de partículas produzidos pelos diferentes tipos de ondas planas



Fonte: Santos (2014)

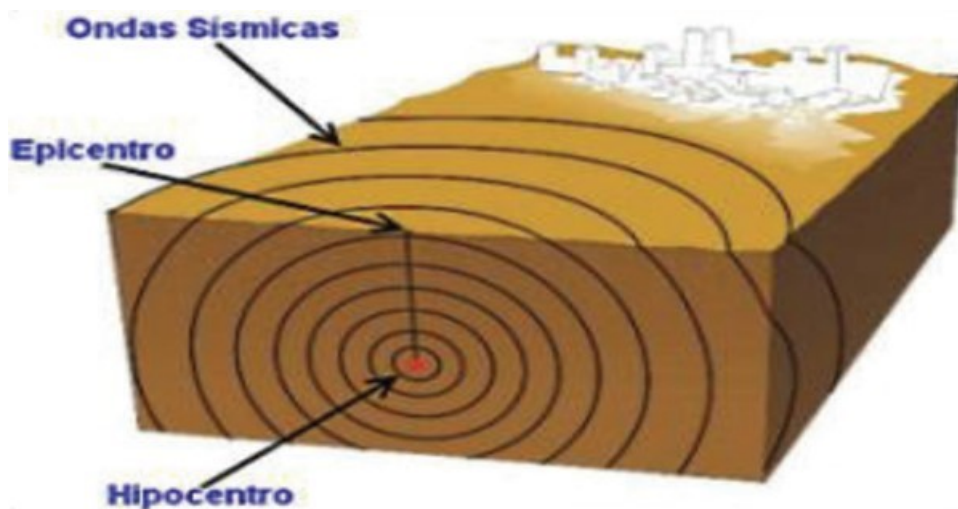
### 2.1.3 Classificação dos Terremotos

Para melhor definição desse tópico, temos como amostra duas grandezas que são essenciais para o entendimento sobre classificação de terremotos, são elas:

- Hipocentro: Local sob o manto rochoso onde é iniciada a liberação de energia sísmica (MUÑOZ, 2015);
- Epicentro: Local sobre a superfície terrestre situado na interseção de um raio terrestre que passa pelo hipocentro com a superfície da terra (MUÑOZ, 2015).

Quais são ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Localização geográfica do hipocentro e epicentro de um sismo



Fonte: Santos (2014)

#### 2.1.3.1 Escala Richter

Desenvolvida em 1935 pelos sismólogos Charles Richter e Beno Gutenberg, a escala Richter segundo Parisenti (2011), pode determinar a quantidade de energia liberada durante uma determinada onda sísmica, que é obtida através da amplitude dessa onda. A escala Richter varia em graus e está relacionada ao nível de energia liberada pelos sismos, ela normalmente varia de 0 a 9 graus, porém não possui limites, entretanto nunca foi registrado nenhum terremoto com magnitude superior a 10 (PARISENTI, 2011).

Na Figura 4, podemos ter uma breve percepção das consequências relacionadas ao grau de atuação do abalo sísmico.

**Figura 4 - Ordem de grandeza da magnitude dos terremotos**

| <i>Descrição</i>     | <i>Magnitude</i> | <i>Efeitos</i>  | <i>Frequência</i>   |
|----------------------|------------------|---|---------------------|
| <i>Micro</i>         | <i>&lt; 2,0</i>  | <i>Micro tremor, não se sente.</i>  | <i>~8000/dia</i>    |
| <i>Muito pequeno</i> | <i>2,0-2,9</i>   | <i>Geralmente não se sente, mas é detectado/registrado.</i>   | <i>~1000/dia</i>    |
| <i>Pequeno</i>       | <i>3,0-3,9</i>   | <i>Frequentemente sentido, mas raramente causa danos. Comparável à vibração de um caminhão</i>  | <i>49000/ano</i>    |
| <i>Ligeiro</i>       | <i>4,0-4,9</i>   | <i>Tremor de objetos dentro das habitações. Pode quebrar janelas e derrubar objetos. Danos importantes pouco comuns.</i>                              | <i>~6200/ano</i>    |
| <i>Moderado</i>      | <i>5,0-5,9</i>   | <i>Pode causar danos maiores em edifícios mal concebidos. Provoca danos ligeiros nos edifícios bem construídos. A mobília se move e o reboco cai.</i> | <i>800/ano</i>      |
| <i>Forte</i>         | <i>6,0-6,9</i>   | <i>Pode ser destruidor em zonas num raio de até 180 quilómetros em áreas habitadas. Dano a construções fortes, dano severo a construções fracas.</i>  | <i>120/ano</i>      |
| <i>Grande</i>        | <i>7,0-7,9</i>   | <i>Pode provocar danos graves em zonas mais vastas. Prédios saem das fundações; rachaduras surgem na terra; tubulações subterrâneas se quebram.</i>   | <i>18/ano</i>       |
| <i>Importante</i>    | <i>8,0-8,9</i>   | <i>Pode causar danos sérios em zonas num raio de centenas de quilómetros. Pontes se rompem; poucas construções resistem de pé.</i>                    | <i>1/ano</i>        |
| <i>Excepcional</i>   | <i>9,0 &gt;</i>  | <i>Devasta zonas num raio de milhares de quilómetros. As ondas se movendo pela terra são visíveis a olho nu.</i>                                      | <i>1 em 20 anos</i> |

*Os efeitos de cada abalo sísmico variam bastante devido à distância, às condições do terreno, às condições das edificações e de outros fatores.*

**Fonte: Parisenti (2011).**

A Magnitude  $M$  é definida pela equação (1).

$$M = \log \frac{A}{T_r} + 1,66 \log(\Delta) + 3,3 \quad (1)$$

Sendo que:

- $A$  é amplitude máxima de onda Rayleigh (em  $\mu\text{m}$ );
- $T_r$  é o período desta oscilação máxima (em segundos);
- $\Delta$  é a distância do epicentro em graus (medidas do centro da Terra,  $1^\circ = 111 \text{ km}$ ).

### 2.1.4 Os piores terremotos registrados no mundo

Quanto mais próximo do epicentro mais grave tende a ser o abalo sísmico. Na Figura 5, estão representados os maiores abalos sísmicos da história, dos quais estão localizados nas proximidades dos encontros de placas tectônicas.

**Figura 5 - Piores terremotos da história**

| Data | Local             | Mortes (Estimativa)   | Escala Richter (Graus) |
|------|-------------------|---|------------------------|
| 1138 | Síria             | 230 mil   | 8,2                    |
| 1556 | China             | 830 mil   | 8,8                    |
| 1737 | Índia             | Mais de 300 mil   | 8,6                    |
| 1755 | Portugal          | Mais de 70 mil  | 8,7                    |
| 1906 | Valparaiso, Chile | Mais de 20 mil  | 8,1                    |
| 1920 | Ningxia, China    | 235 mil   | 8,5                    |
| 1923 | Yokohama, Japão   | 140 mil morreram  | 8,2                    |
| 1927 | Gansu, China      | Mais de 80 mil  | 8,0                    |
| 1927 | Nanshan, China    | Mais de 200 mil   | 8,0                    |
| 1934 | Bihar, Índia      | Pelo menos 10700  | 8,3                    |
| 1939 | Erzincan, Turquia | Entre 35 e 40 mil   | 8                      |
| 1960 | Chile             | Tremor no mar que provocou tsunamis – entre 2000 e 5700 pessoas | 8,5                    |
| 1985 | Cidade do México  | Pelo menos 10 mil   | 8,1                    |
| 2004 | Sul da Ásia       | Mais de 143 mil   | 9,0                    |
| 2010 | Chile             | Mais de 800   | 8,8                    |
| 2011 | Japão             | Mais de 14 mil mortes e 10 mil desaparecidos                    | 8,9                    |

Fonte: Alves (2015).

Através desta imagem pode-se concluir que, muitas vezes a maior escala não representa maior nível de destruição e números de mortos, isso está relacionado com as técnicas e os níveis de segurança impostos por cada região para prevenir a ação dos abalos sísmicos. Para exemplo de comparação, vamos exemplificar os abalos sísmicos ocorrido em 2010 no Haiti, com escala de 7 graus, e o de 2011 no Japão, com escala de 8,9 graus, que aconteceram em datas próximas.

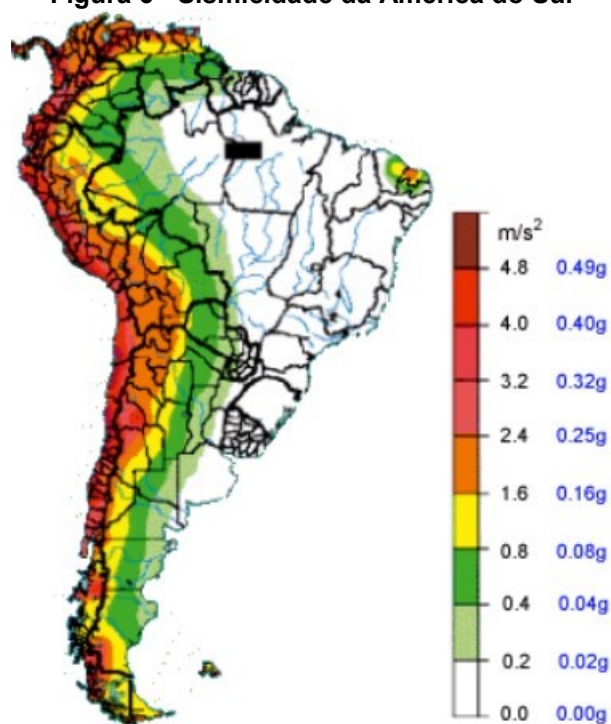
Como mencionado anteriormente, ocorreram 14 mil mortes no Japão enquanto no Haiti passou de 200 mil mortes. Como sabemos, o Japão é um centro tecnológico, o qual por meio de aplicações de determinadas técnicas conseguiu 14 vezes menos números de mortos do que no Haiti, mesmo com um grau na escala Richter expressivamente maior, isso determina o grau de importância de equipamentos que previnam e que contenham esses abalos para sociedade.

### 2.1.5 Os Piores Terremotos Registrados no Brasil

No Brasil encontram-se poucos relatos de terremotos graves. Segundo Parisenti (2011), isso é devido ao privilegiado posicionamento sobre as placas tectônicas, que está localizado no interior da placa América do Sul que se caracteriza por ser mais estável. Outro fator é porque o Brasil está localizado a uma certa distância considerável de encontros de placas tectônicas, o qual é o principal ocasionador de abalos sísmicos registrado no mundo.

Na Figura 6 está representado os níveis de abalos sísmicos da América do Sul, devido a inexistência de um estudo focalizado no Brasil.

**Figura 6 - Sismicidade da América do Sul**



**Fonte: Santos (2014).**

Na Figura 6 observa-se que o Brasil é um país relativamente seguro em questões de abalos sísmicos, entretanto a Figura 7 referência os dados históricos de abalos sísmicos maiores do que 5 graus na escala Richter, deixando um alerta que, mesmo de modo esporádico, há ocorrências de terremotos consideráveis em território nacional.

Figura 7 - Piores abalos sísmicos no Brasil

| <b>Data</b> | <b>Local</b>                           | <b>Escala Richter<br/>(Graus)</b> |
|-------------|--|-----------------------------------|
| 1922        | São Paulo                              | 5,1                               |
| 1955        | Espírito Santo                         | 6,1                               |
| 1955        | Mato Grosso                            | 6,2                               |
| 1980        | Ceará                                  | 5,2                               |
| 1983        | Amazonas                               | 5,5                               |
| 1986        | Rio Grande do Norte                    | 5,1                               |
| 2008        | Oceano Atlântico, litoral de São Paulo | 5,2                               |
| 2007        | Acre                                   | 6,5                               |
| 2010        | Amazonas (divisa com Acre)             | 6,1                               |

Fonte: Parisenti (2011).

## 2.2 ANALISE MODAL

Análise Modal, consiste em analisar as propriedades dinâmicas das quais estão expostas a uma determinada vibração. Através da análise modal pode se obter os fatores de amortecimento, modos de vibração e as frequências naturais.

Atualmente, pode ser obtida por meio de testes experimentais como teste de impacto ou por meio de análise teórica (HALIMI, 2012).

### 2.2.1 Modos de Vibração

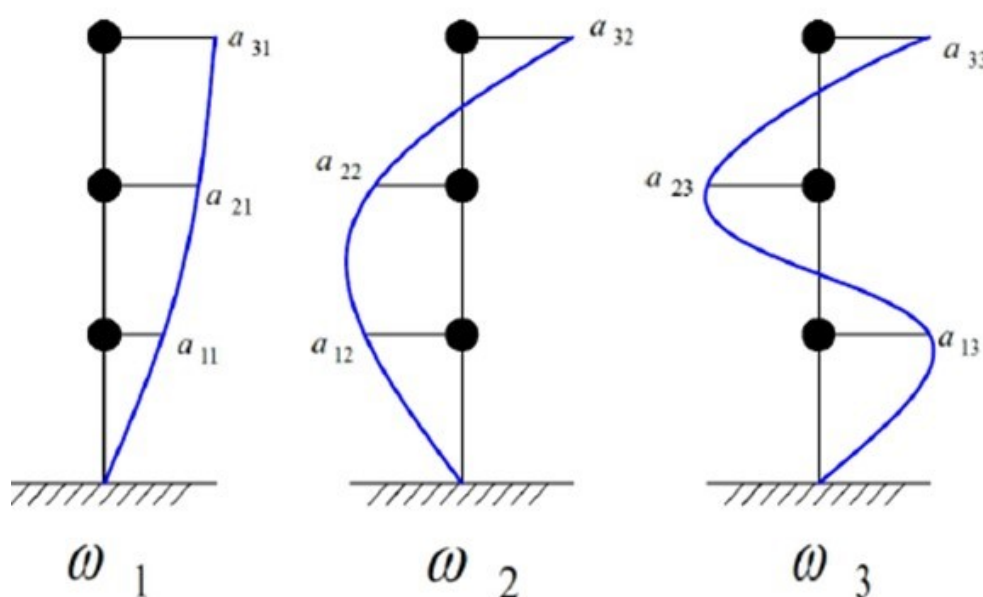
Cada estrutura possui seus modos de vibração ou ressonâncias, conforme as propriedades dos materiais envolvidos. Sendo elas: a rigidez, massa amortecimento e suas condições de contorno. Cada modo de vibração possui uma frequência natural e fator de amortecimento característico, quando uma fonte externa esteja trabalhando perto destas frequências naturais ocorre o fenômeno de ressonância, da qual ocorre um aumento das amplitudes de deslocamento desta estrutura (SCHWARZ; RICHARDSON, 1999).

A excitação de modo de vibração pode ser dada em qualquer ponto desta estrutura, com exceções dos pontos nodais, que são invariantes e assim não possuindo deslocamento em um determinado modo de vibração.

De acordo com Schwarz e Richardson (1999), os modos de vibração são caracterizados como corpos rígidos ou flexíveis. Todas as estruturas podem ter até seis modos de corpo rígido, sendo três modos de translação e três modos de rotação.

A Figura 8 demonstra três modos de vibração de translação de uma estrutura com três pavimentos. Dos quais são  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  e  $\omega_3$  são frequências naturais e  $a_{xy}$  são deslocamentos de cada pavimento para cada frequência natural.

**Figura 8 - Representação dos modos de vibração de um edifício de três pavimentos**



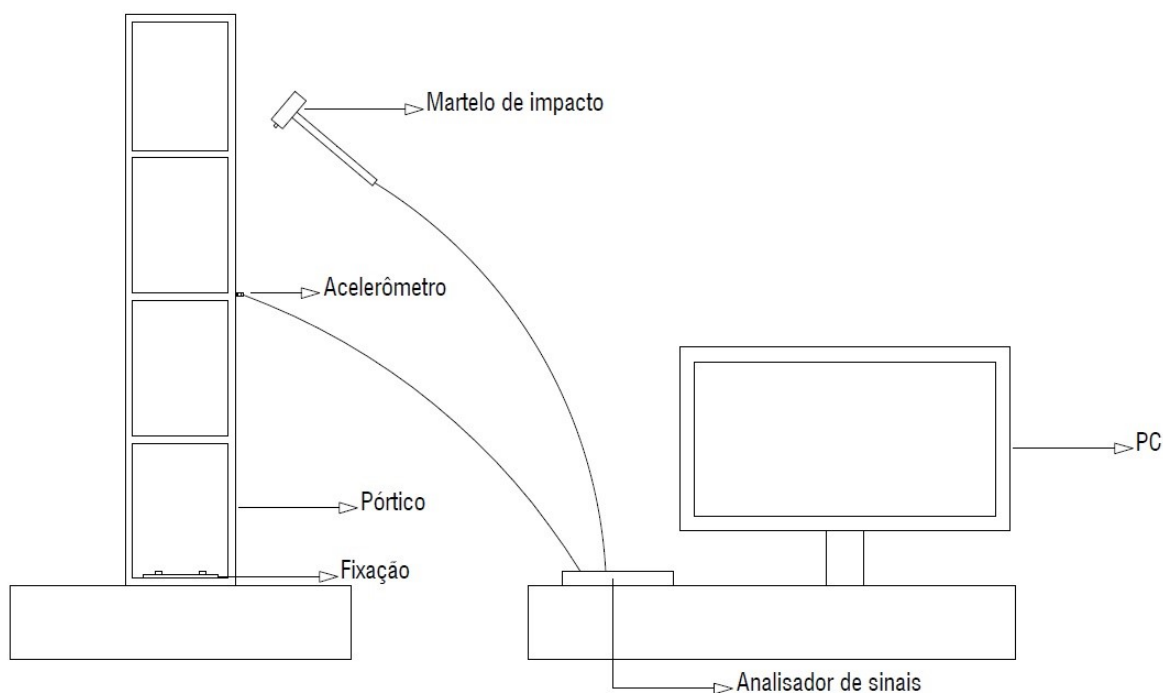
Fonte: Alves (2015)

### 2.3.2 Testes de impacto

A partir dos anos de 1970 a análise modal começou ser difundida, isso devido à invenção do teste de impacto, os quais possuem uma maneira rápida e relativamente de baixo custo para obtenção dos modos de vibração (SCHWARZ; RICHARDSON, 1999).

A Figura 9 ilustra de forma geral o procedimento experimental do teste de impacto.

**Figura 9 - Representação esquemática do teste de impacto**



**Fonte: Andretta (2017)**

Para realizar os testes de impacto são necessários um martelo de impacto, um acelerômetro, um analisador com dois ou quatro canais de FFT (Fast Fourier Transform) e Software para processamento das informações.

## 2.4 ABSORVEDORES DINÂMICOS

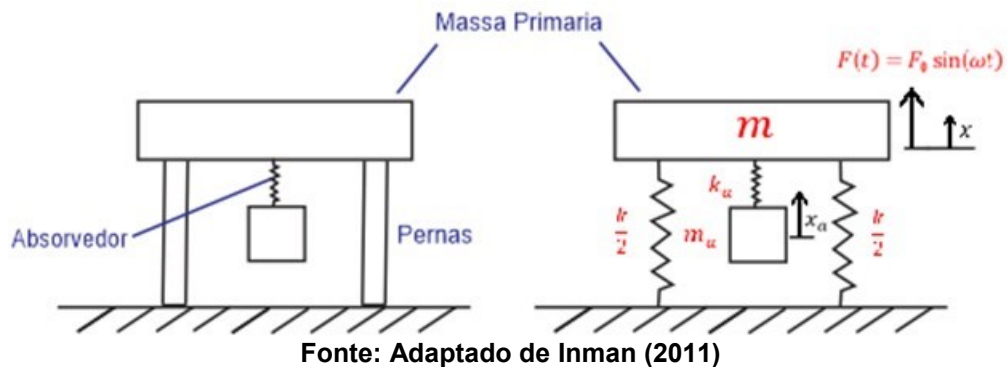
Com intuito de reduzir as vibrações de ressonância da estrutura, iremos utilizar ADVs que possuem bons resultados e suas aplicações normalmente não possuem dificuldades construtivas.

### 2.4.1 Absorvedores Dinâmicos de Vibração (ADV) Sem Amortecimento.

Um absorvedor consiste em uma segunda combinação de massa-mola adicionada ao dispositivo primário para protegê-lo da vibração. O principal efeito de adicionar o segundo sistema massa-mola é mudar de um sistema único grau de liberdade para um sistema de dois graus de liberdade (INMAN, 2011).



Figura 10 - Sistema acoplado com ADV não amortecido



Assim o novo sistema possui duas frequências naturais. Os valores de massa e rigidez do ADV são escolhidos de tal forma que o movimento do sistema original seja o mínimo possível nas regiões de frequências naturais (INMAN, 2011).

Demonstrando esse princípio, o movimento acoplado da Figura 10 é dado pela equação (2).

Onde  $x = x(t)$  é o deslocamento do sistema principal com massa  $m$  e rigidez  $k$ . Já no sistema do ADV o deslocamento é representado por  $x_a = x_a(t)$  e a massa por  $m_a$  e rigidez por  $k_a$  (INMAN, 2011).

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \sin \omega t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A solução estacionária, é dada por:

$$x(t) = X \sin \omega t \quad (3)$$

$$x_a(t) = X_a \sin \omega t \quad (4)$$

Substituindo na equação (2), temos:

$$\begin{bmatrix} k + k_a - m\omega^2 & -k_a \\ -k_a & k_a - m_a\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \sin \omega t \quad (5)$$

Após algumas manipulações algébricas são determinadas as magnitudes de vibração do estado estacionário:

$$X = \frac{(k_a - m_a \omega^2) F_0}{(k + k_a - m \omega^2)(k_a - m_a \omega^2) - k_a^2} \quad (6)$$

$$X_a = \frac{k_a F_0}{(k + k_a - m \omega^2)(k_a - m_a \omega^2) - k_a^2} \quad (7)$$

Na equação (6) pode-se escolher os parâmetros do absorvedor, tal que a magnitude da vibração em estado estacionário  $X$ , seja zero. Para isso ocorrer, a frequência de excitação tem que ser anulada através dos parâmetros  $k_a$  e  $m_a$ , de forma que:

$$\omega^2 = \frac{k_a}{m_a} \quad (8)$$

Portanto, se os parâmetros do absorvedor forem escolhidos para satisfazer a condição de equação (8), isso resulta em um deslocamento da massa primária igual a zero, isso é  $X = 0$  (INMAN, 2011). De maneira análoga, se substituirmos a equação (8) na equação (7), temos:

$$x_a(t) = -\frac{F_0}{k_a} \sin \omega t \quad (9)$$

Desta maneira, o sistema do ADV exerce sobre o sistema primário uma força igual e sentido contrário à força de excitação, assim gerando o equilíbrio deste sistema (INMAN, 2011).

Com intuito de deixar a equação (6) e a equação (7), em parâmetros físicos mais fáceis de mensurar, será introduzido parâmetros e se realizará manipulações para chegar a uma equação mais compreensível (MARQUES, 2000).

$$\frac{Xk}{F_0} = \sqrt{\frac{(r^2 - \beta)^2}{(\mu r^2 \beta^2 - (r^2 - 1)(r^2 - \beta^2))^2}} \quad (10)$$

$$\frac{X_a k}{F_0} = \sqrt{\frac{r^2}{(\mu r^2 \beta^2 - (r^2 - 1)(r^2 - \beta^2))^2}} \quad (11)$$

sendo:

$$\mu = \frac{m_a}{m} \quad \text{Razão de massas;}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Frequência natural original do sistema primário;}$$

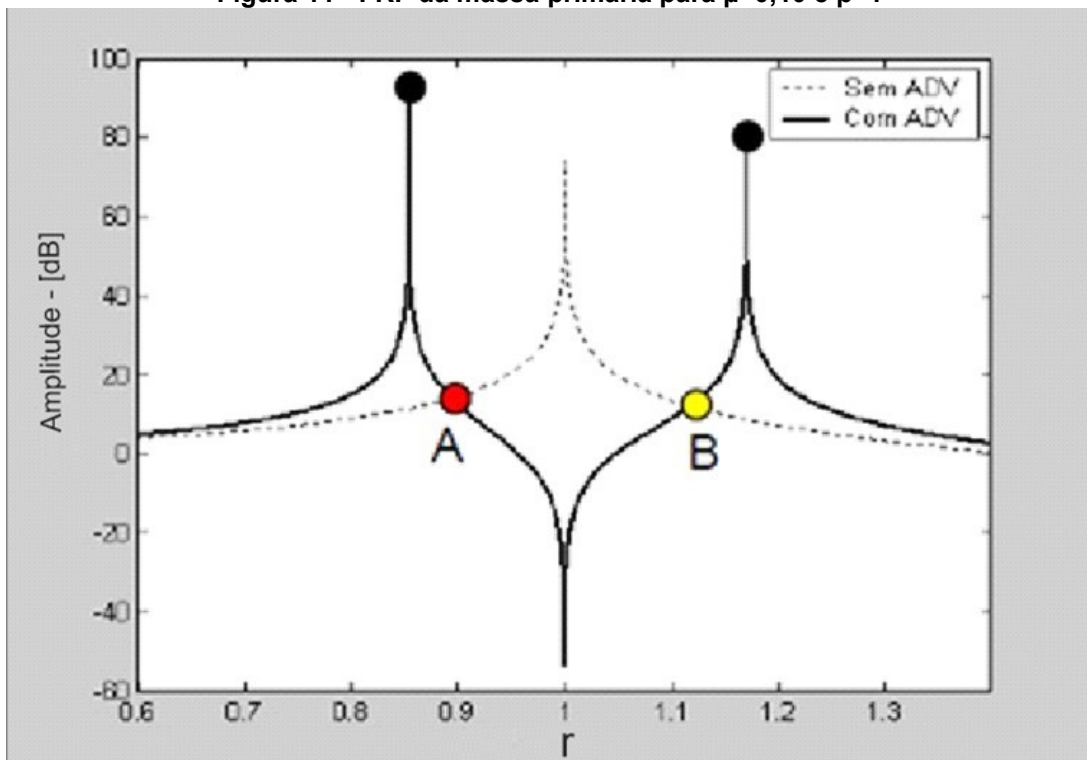
$$\omega_a = \sqrt{\frac{k_a}{m_a}} \quad \text{Frequências naturais do sistema do ADV;}$$

$$\beta = \frac{\omega_a}{\omega_p} \quad \text{Fator de Sintonização;}$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_p} \quad \text{Frequência de excitação normalizada.}$$

A Figura 11 demonstra as curvas Função de Resposta em Frequência FRFs, tanto para a estrutura primária que está representado pela linha tracejada, quanto para o sistema acoplado com o ADV. Os parâmetros adotados para obter essas curvas são  $\beta=1$  e  $\mu = 0,1$  (MARQUES, 2000).

Figura 11 - FRF da massa primária para  $\mu=0,10$  e  $\beta=1$



Fonte: Adaptado de Marques (2000)

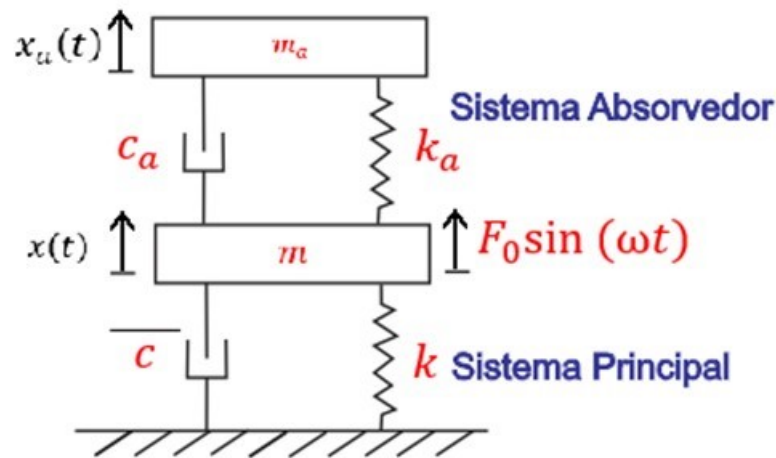
Nota-se na Figura 11, uma absorção da ressonância do qual é substituído por uma antirressonância. Porém, observa-se que o ADV gera dois novos picos de

ressonância do qual representa as frequências naturais do sistema com dois graus de liberdade (MARQUES, 2000).

Os pontos A e B ilustrados na Figura 11, representam a banda operacional do ADV, que por sua vez está relacionada com relação das massas  $\mu$ . do qual, quanto menor  $\mu$ , mais estreita fica a banda operacional do ADV (MARQUES, 2000).

Na Figura 12, está a representação esquemática de um sistema primário e um ADV acoplados, sendo que, ambos estão com amortecimento.

Figura 12 - Desenho esquemático do sistema primário e ADV com amortecedores



Fonte: Adaptado de Inman (2011)

As equações do movimento do sistema da Figura 12 são representadas na forma de matriz, por:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{x}_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c + c_a & -c_a \\ -c_a & c_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \sin \omega t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Considerando que a solução seja na forma de

$$x(t) = X e^{j\omega t} = \begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (13)$$

Substituindo na equação (12), temos

$$\begin{bmatrix} (k + k_a - m\omega^2) + (c + c_a)\omega j & -k_a - c_a\omega j \\ -k_a - c_a\omega j & (k_a - m_a\omega^2) + c_a\omega j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} e^{j\omega t} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (14)$$

Após algumas operações matemáticas chegamos nas amplitudes em regime harmônico

$$X = \frac{[(k_a - m_a \omega^2) + c_a \omega j] F_0}{\det(k - \omega^2 M + \omega j C)} \quad (15)$$

$$X = \frac{[(k_a - m_a \omega j) + c_a \omega j] F_0}{\det(k - \omega^2 M + \omega j C)} \quad (16)$$

O determinante das equações (15) e (16) é dado por

$$\det(K - \omega^2 M + \omega j C) = m m_a \omega^4 + (c_a c + m_a (k_a + k_A) + k_a m) \omega^2 + k_a k + [(k c_a + c k_a) \omega - (c_a (m + m_a) + c m_a) \omega^3] j \quad (17)$$

E as matrizes de coeficiente do sistema M, C e K são dadas por

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_a \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c + c_a & -c_a \\ -c_a & c_a \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} k + k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix}$$

As equações (15) e (16) podem ser analisadas para vários casos específicos. Primeiro, considerar o caso para o qual o amortecimento interno do sistema primário é negligenciado  $c = 0$ . Se o sistema primário for de metal, o amortecimento interno provavelmente será muito baixo e é razoável negligenciá-lo em muitas circunstâncias (INMAN, 2011).

Neste caso, o determinante da equação (17) reduz para o número complexo

$$\det(K - \omega^2 M + \omega j C) = [(-m \omega^2 + k)(-m_a \omega^2 + k_a) - m_a k_a \omega^2] + [k - (m + m_a) \omega^2] c_a \omega j \quad (18)$$

A deflexão máxima da massa primária é dada pela equação (15) com o determinante representado na equação (18). Isto é, a relação de dois números complexos e, portanto, é um número complexo que representa a fase e a amplitude

da resposta da massa primária. Usando aritmética complexa a amplitude do movimento da massa primária pode ser escrito como o número real

$$\frac{X^2}{F_0^2} = \frac{(k_a - m_a \omega^2)^2 + \omega^2 c_a^2}{[(k - m_a \omega^2)(k_a - m_a \omega^2) - m_a k_a \omega^2]^2 + [k - (m + m_a) \omega^2]^2 c_a^2 \omega^2} \quad (19)$$

O fator de amortecimento é definido pela equação (20)

$$\zeta = \frac{c_a}{2m_a \omega_p} \quad (20)$$

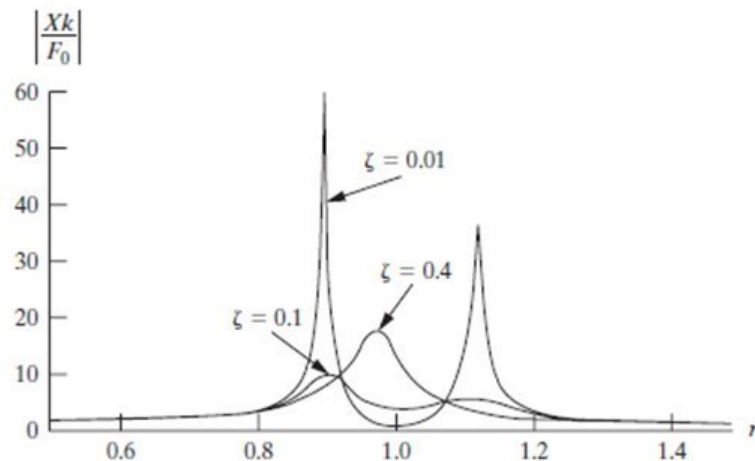
Substituindo a equação (20) e os parâmetros  $\mu$ ,  $\beta$  e  $r$  na equação (19), temos

$$\frac{Xk}{F_0} = \sqrt{\frac{(2\zeta r)^2 + (r^2 - \beta^2)^2}{(2\zeta r)^2 (r^2 - 1 + \mu r^2)^2 + [\mu r^2 \beta^2 - (r^2 - 1)(r^2 - \beta^2)]^2}} \quad (21)$$

A equação (21) expressa a amplitude adimensional do sistema primário. Ela é determinada por quatro parâmetros físicos, que são escolhidos de forma que se obtenha um menor valor possível da resposta da massa primária  $X$ , para uma determinada aplicação (INMAN, 2011).

A Figura 13 ilustra como fator de amortecimento  $\zeta$  afeta as respostas das curvas FRFs, com valores fixos de  $\mu = 0.25$  e  $\beta = 1$ .

**Figura 13 – FRF da massa primária com  $\mu=0.25$  e  $\beta=1$ .**



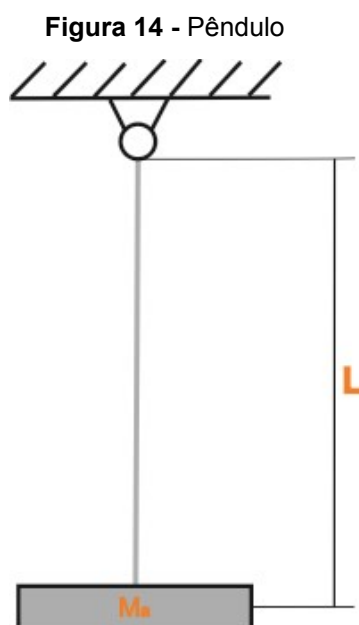
Fonte: Inman (2011)

Analisando as curvas de fatores de amortecimento de  $\zeta = 0,01$  e  $\zeta = 0,1$  da Figura 13, conclui-se que quanto maior os parâmetros de amortecimento do ADV, menores são as amplitudes de vibração gerada pela antirressonância. Porém em um determinado fator de amortecimento, a antirressonância retorna aumentar sua amplitude de vibração, gerando apenas um pico de antirressonância ao invés de duas curvas geradas anteriormente.

#### 2.4.1.1 Pêndulo

O tipo do ADV escolhido para aplicar neste trabalho, foi do pêndulo, devido sua facilidade construtiva, e sua vasta utilização em projetos reais de prevenção de abalos sísmicos em prédios.

O qual consiste em uma massa  $m_a$  fixada em uma corda de comprimento  $L$ , conforme está ilustrado na Figura 14.



**Fonte: Autoria própria (2019)**

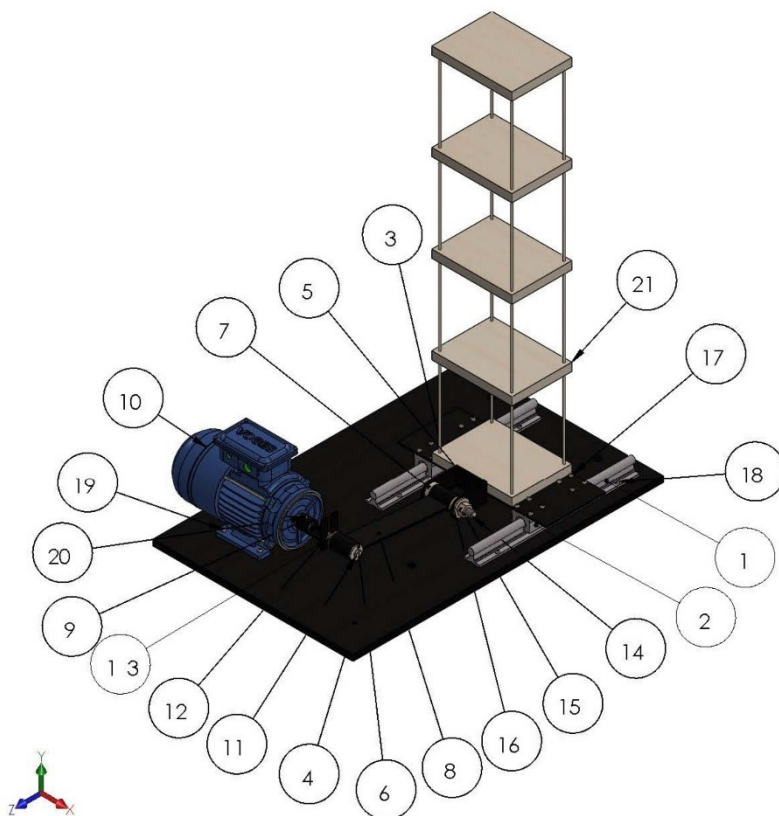
A equação (22) representa a frequência natural do pêndulo, para o caso aplicado neste trabalho.

$$\omega_a = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (22)$$

### 3 METODOLOGIA

Nessa seção são apresentados os materiais e métodos empregados para o desenvolvimento da bancada proposta neste trabalho, a fim de alcançar os objetivos propostos.

**Figura 15 - Bancada Didática com Balões de Componentes Numerados**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

Para facilitar a descrição do desenvolvimento da bancada, foi numerado os componentes contidos, que está ilustrado na Figura 15.

A Tabela 1, denota todos os componentes ilustrados na Figura 15, a qual descreve a quantidade e o nome de cada componente.



Tabela 1 - Lista dos Componentes da Bancada Didática

| Nº DO ITEM | NOME DO COMPONENTE             | QTD. |
|------------|--------------------------------|------|
| 1          | Eixo Suportado                 | 2    |
| 2          | Pillow Block SBR               | 4    |
| 3          | Chapa de Fixação do Protótipo  | 1    |
| 4          | Base de MDF                    | 1    |
| 5          | Fixador U                      | 1    |
| 6          | Bucha Para Parafuso M8         | 1    |
| 7          | Bucha Para Parafuso M14        | 1    |
| 8          | Biela                          | 1    |
| 9          | Manivela                       | 1    |
| 10         | Motor Voges BD 71 B            | 1    |
| 11         | Parafuso de Máquina M8x85x25   | 1    |
| 12         | Porca M8                       | 3    |
| 13         | Arruela Para Parafuso M8       | 3    |
| 14         | Parafuso de Máquina M14x110x35 | 1    |
| 15         | Porca M14                      | 1    |
| 16         | Arruela Para Parafuso M14      | 1    |
| 17         | Parafuso M4x20                 | 16   |
| 18         | Parafuso de Madeira M4x25      | 12   |
| 19         | Parafuso de Madeira M5x25      | 4    |
| 20         | Parafuso Sem Cabeça M4x15      | 1    |
| 21         | Protótipo                      | 1    |
| 22         | Parafuso M5x25                 | 4    |

Fonte: Autoria própria (2019)

### 3.1 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA

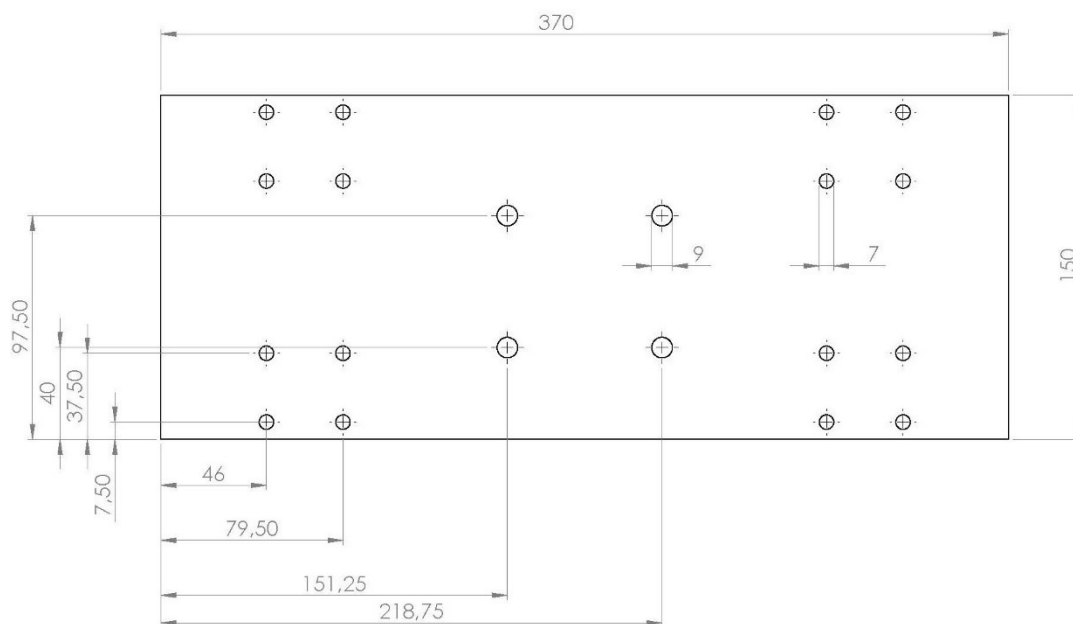
O início construtivo da bancada deu-se, pela fixação do Pillow Block SBR com a Chapa de Fixação do Protótipo de 3 mm de aço carbono SAE1040. Foi estabelecido as distâncias entres os Pillow Blocks e realizados dezesseis furos de 5 mm, assim deixando uma folga de 1 mm para encaixe dos parafusos.

Após fixação dos Pillow Blocks com a chapa de fixação do protótipo, através de dezesseis parafusos M4, foram realizados doze furos para fixar os dois eixos suportados na base de MDF. A fixação deu-se por doze parafusos de madeira M4.

Para fixar o protótipo na bancada, foram realizados quatro furos de 6 mm, estrategicamente os furos deixou o centro protótipo alinhado com centro fixador U. Foram utilizados quatro parafusos M5 para fixação.

Assim a chapa de fixação do protótipo ficou com os seguintes furos, ilustrado na Figura 16.

**Figura 16 – Chapa de Fixação do Protótipo**

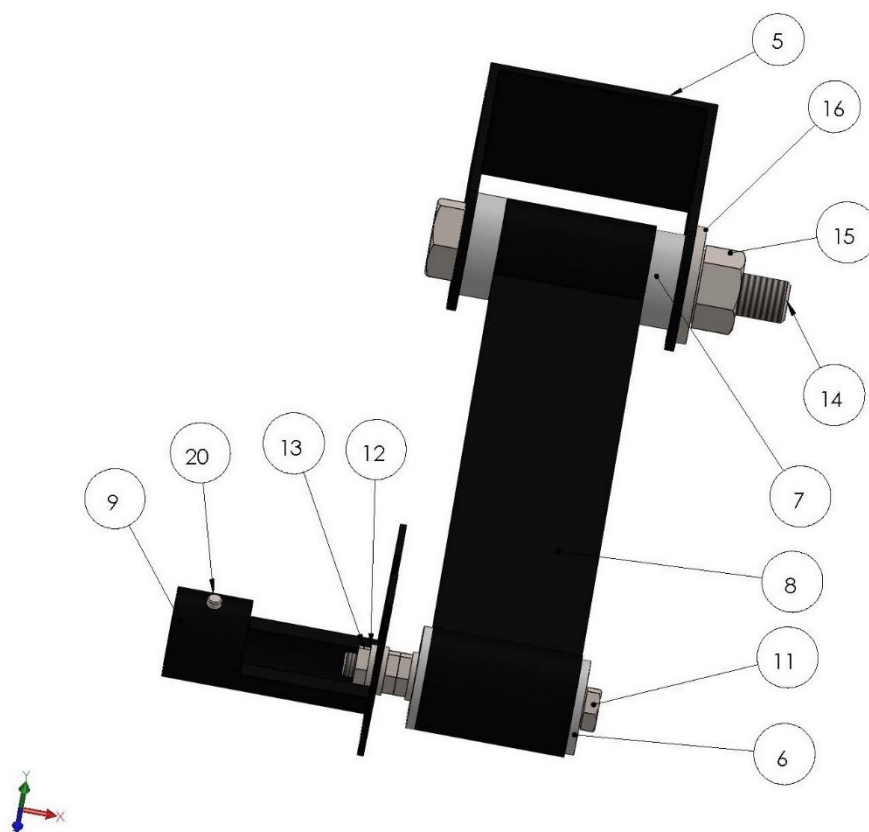


**Fonte: Autoria própria (2019)**

O fixador U foi soldado na chapa de fixação do protótipo, de uma forma que ele ficou centralizado na mesma, com isso garantindo que o protótipo vibre de maneira uniforme, pois a transmissão do movimento está localizada no meio, assim reduzindo vibrações torcionais em torno do eixo Y da Figura 15.

A Figura 17 ilustra o sistema biela manivela que é responsável pela transmissão de movimentos.

**Figura 17 – Sistema Biela manivela**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

A biela foi construída com dois tubos de aço de 50 mm, o qual foi soldado em uma chapa de 4 mm de espessura com 250 mm de comprimento. Estabelecido os diâmetros dos parafusos, usinou-se duas buchas de nylon, o qual seus respectivos comprimentos se igualam a parte lisa dos parafusos de maquinas utilizados.

Com intuito fixar a manivela com fixador U, utilizou um parafuso M14 com sua receptiva bucha, da qual seu comprimento se iguala a largura interna do fixador U.

Para unir biela e manivela, utilizou-se três porcas para parafusos M8 e três arruelas. Duas porcas servem para travar a bucha de um modo que deixe apenas uma folga para não travar a movimentação do sistema, a terceira porca serve para prender na manivela e regular amplitude da oscilação.

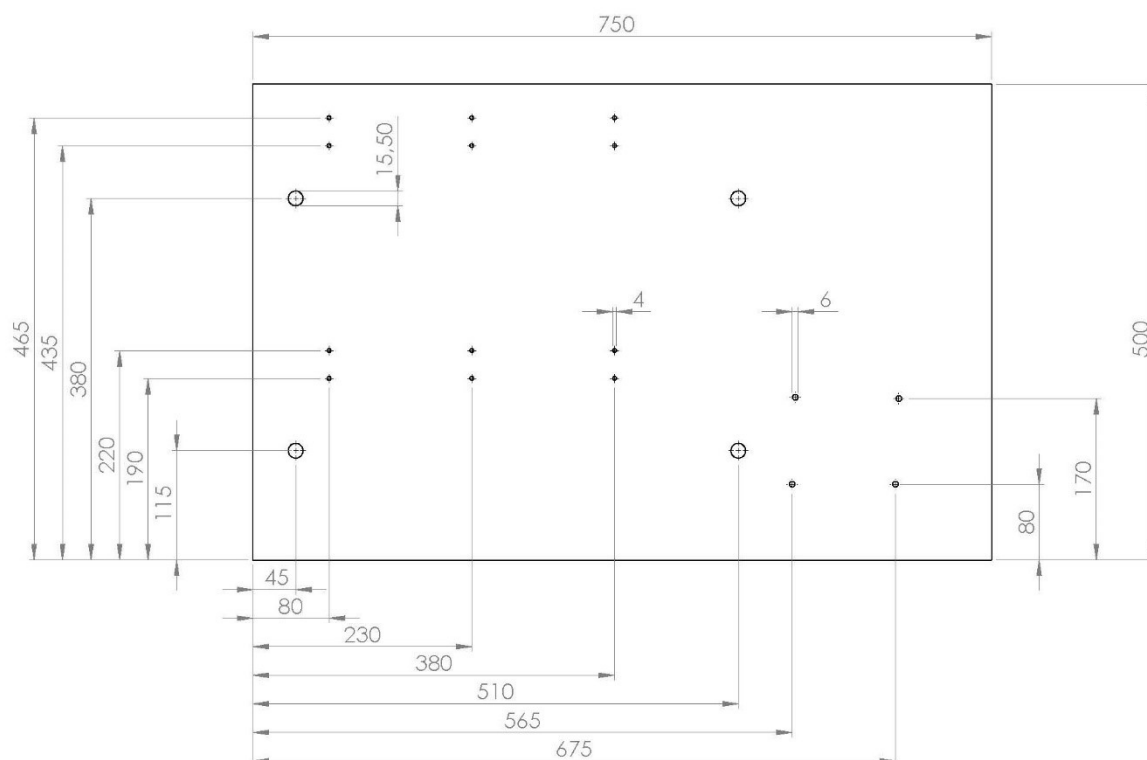
A manivela possui um rasgo, o qual possibilita o ajuste da amplitude de vibração do sistema, partindo de uma regulação de 0 mm a 70 mm, isso é possível devido ao alinhamento centro do parafuso M8 junto ao eixo do motor e rasgo inferior

da manivela. Nota-se que, a distância da parte inferior do parafuso está com a parte inferior do rasgo, representa a metade da amplitude de vibração do sistema.

A Manivela foi fixada no entalhe do eixo do motor através de um parafuso sem cabeça M4.

Após estabelecer e fixar todos os componentes, alinhou o motor e posicionou-se na distância requerida, realizando mais quatro furos necessários para fixar o motor com a Chapa de MDF, com auxílio de quatro parafusos de madeira M5 o motor foi fixado. Assim a Chapa de MDF ficou com os seguintes furos ilustrados na Figura 18.

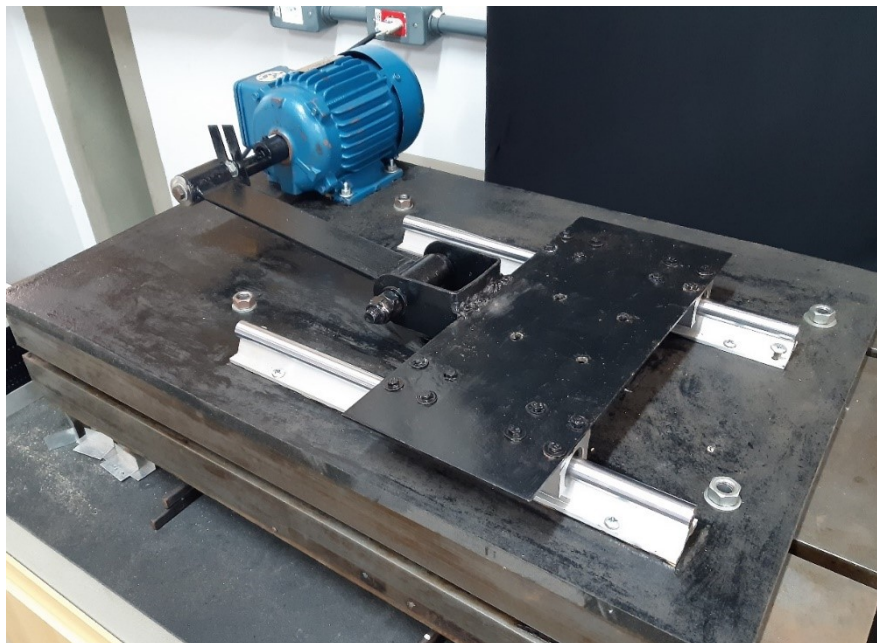
**Figura 18 - Chapa de MDF**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

A bancada foi instalada em uma base de sustentação, que está no laboratório de vibrações da UTFPR, campus Pato Branco, Ilustrada pela Figura 20. Esta base possui guias, que foram utilizadas para fixação da bancada, desta forma a bancada fica imóvel durante os experimentos.

**Figura 19 - Bancada fixa na base de sustentação.**

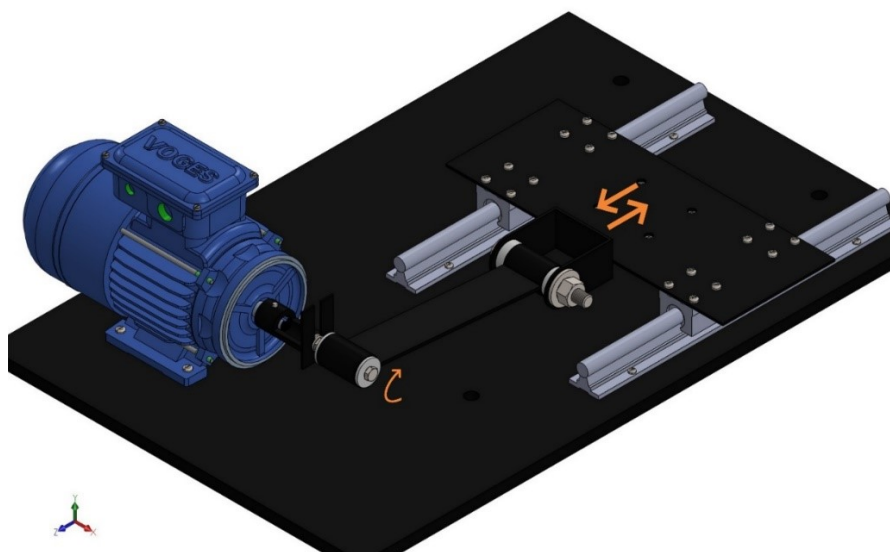


Fonte: Autoria própria (2019)

### 3.1.2 Sistema de Movimentação

O sistema de movimentação da bancada didática transforma o movimento rotacional para um movimento longitudinal de vai e vem, o qual se assemelha com a vibração sofrida em um terremoto, demonstrado na Figura 20. As guias lineares utilizadas, deixam o movimento o mais suave possível.

**Figura 20 - Sistema de movimentação da bancada.**



Fonte: Autoria própria (2019)

O motor utilizado é da marca Voges de 0,3 CV de 4 polos, 1800 rpm, de tal modo possui uma excitação máxima de 30 Hz, que é controlado por um inversor de frequência da marca Mooler de 1 CV, possibilitando assim, que a excitação do sistema varie de 0 a 30 Hz.

### 3.2 PROTÓTIPO DO PRÉDIO

O protótipo foi desenvolvido em um trabalho da disciplina Vibrações do sétimo período da Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Pato Branco, pelos acadêmicos da disciplina.

A Figura 21 ilustra a o protótipo desenvolvido, que foi utilizado nos experimentos, a sua massa é de 2857 gramas.

**Figura 21 - Protótipo de um prédio**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

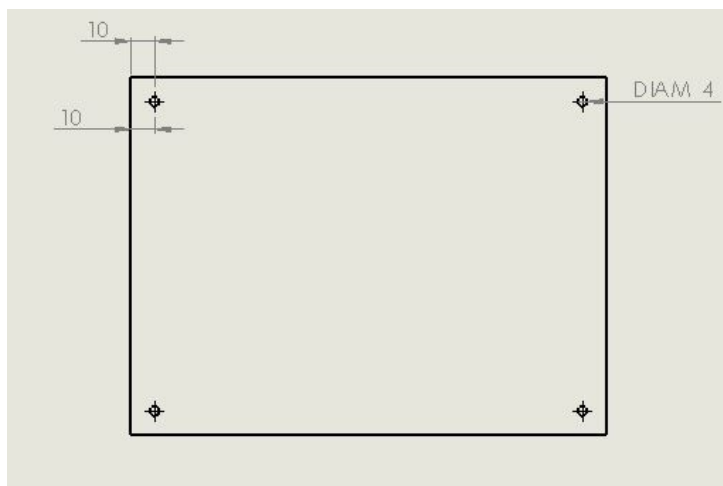
Para construção da estrutura foi utilizado 16 palitos de bambu de 4,5 mm de diâmetro para sustentação, 5 tábuas de Itaúba de 200x150x20 (mm).

Foram cortados os palitos na dimensão de 216 mm, e realizados 8 furos de 4 mm de diâmetro por 8 mm de profundidade nos pavimentos 2, 3 e 4, 4 furos em

cada lado de forma simétrica nos cantos das tábuas. Nos pavimentos 1 e 5 foi realizado um procedimento bem semelhante, porém com 4 furos em apenas um lado.

A Figura 22 ilustra a as dimensões utilizadas para realização dos furos.

**Figura 22 – Furos nas tabuas de itaúba**

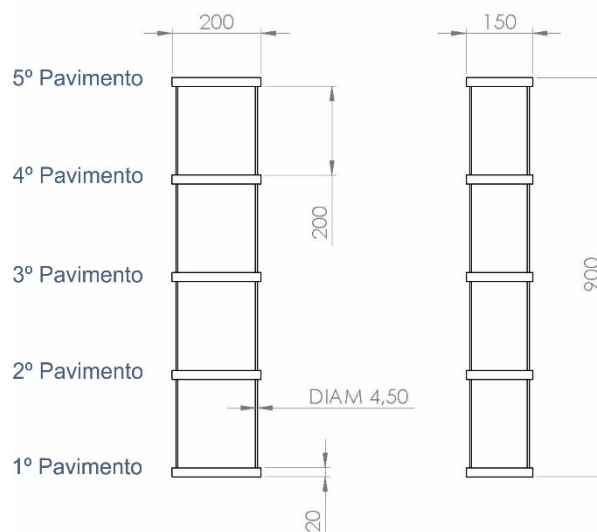


**Fonte: Autoria própria (2019)**

Para fixação dos palitos com as tabuas, foi passado cola tenaz nas pontas dos palitos, além da cola, o fato dos furos terem menos 0,5 mm de diâmetro que os palitos utilizados, ajudou a fixação.

A Figura 23 ilustra as dimensões do protótipo do prédio montado, com os seus respectivos pavimentos.

**Figura 23 – Desenho 2D do protótipo com a numeração dos pavimentos**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

### 3.3 DESENVOLVIMENTO CONSTRUTIVO ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÃO (ADV)

O sistema desenvolvido para construir o ADV foi bem simples, no meio do quinto pavimento paralelo ao sentido do movimento, foram fixados através de 4 parafusos de madeira, uma braçadeira de trinco de porta, responsável por prender um tarugo de madeira.

Na ponta desse tarugo foram realizados dois furos com rosca e assim foram fixados dois parafusos sem cabeça. Com auxílio de porcas e arruelas é preso os barbantes que seguram os pêndulos.

Se utilizou uma mistura de algodão com superbonder para prender o barbante com a massa do pêndulo.

Na direita da Figura 24 tem-se o pêndulo 1 com massa de 168,7 gramas e a esquerda tem-se o pêndulo 2 de massa 118 gramas.

**Figura 24 - Pêndulos**



**Fonte: Autoria própria (2019)**



### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental iniciou-se através das identificações das frequências naturais do protótipo através do teste de impacto. Isso deu-se através dos acelerômetros da marca ENDEVCO modelo 256-100 e do analisador de sinais da marca 01dB de quatro canais dB4.

Para o processamento dos dados coletados foi utilizado o programa dBFA32, fornecido pelo fabricante do analisador de sinais.

O equipamento analisador de sinais precisou ser configurado para realização das medições. Para aquisição dos espectros foram utilizados os seguintes parâmetros: frequência máxima de 200 Hz, janelamento do tipo Hanning com tempo de coleta de 19 segundos. A Figura 25 ilustra o analisador de sinais.

**Figura 25 - Analisador de sinais**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

Os acelerômetros foram fixados com resina nos pavimentos 5 e 3 do protótipo, conforme ilustrado na figura Figura 26.

**Figura 26 - Protótipo com os acelerômetros**



Fonte: Autoria própria (2019)

Após conhecido as frequências naturais, foi utilizado o tacômetro digital para identificar as rotações no eixo do motor que causavam ressonância. A utilização do equipamento é demonstrada na Figura 27.

**Figura 27 - Analisador de sinais**



Fonte: Autoria própria (2019)

Com as rotações coletadas, foram realizadas as coletas de vídeo e fotos das formas modais ocasionada por cada frequência natural e posteriormente comparadas as formas modais obtidas através do programa Ansys.

Após todos esses passos descritos acima, foi calculado os parâmetros do ADV a se utilizar com intuito de reduzir as amplitudes vibracionais ocasionada pelas ressonâncias. Porém através dos cálculos, constatou-se que é possível utilizar o ADV apenas na primeira frequência natural, pois nas demais frequências naturais o comprimento do barbante do pêndulo é muito pequeno, tornando o uso do ADV para demais frequências naturais inviável.

Na primeira coleta de dados das amplitudes vibracionais utilizando o ADV utilizou-se apenas o pêndulo 1, sendo que, na segunda coleta utilizou-se juntamente o pêndulo 1 e o pêndulo 2.

Em ambas as medidas a regulagem de amplitude são de 1,2 mm no sistema biela manivela da bancada didática.

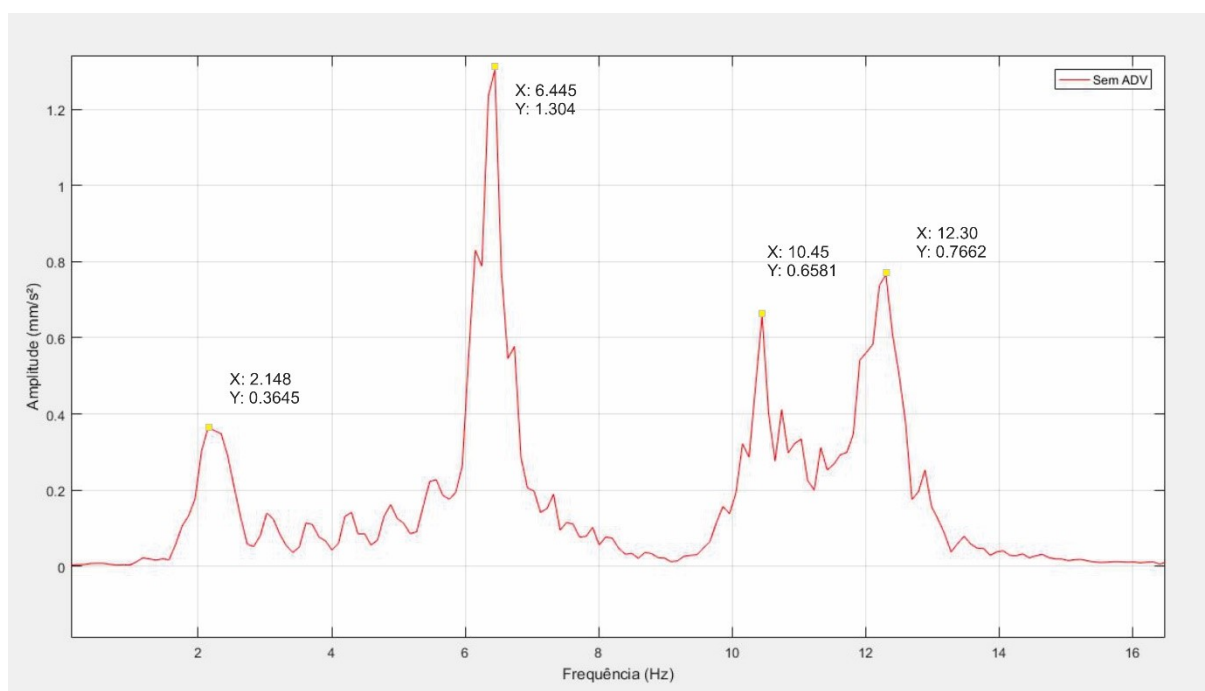
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos, através deles tem-se um amparo experimental nos conteúdos de análise modal, modos de vibração e absorvedores dinâmicos de vibração (ADV), os quais não são encontrados facilmente nas literaturas nacionais.

### 4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS DO PROTÓTIPO

Após o teste de impacto foi obtido as frequências naturais de flexão do protótipo. Com auxílio do programa Matlab foi obtido o gráfico abaixo, ilustrado pela Figura 28.

**Figura 28 - Gráfico FRF sem ADV**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

Observa pela Figura 28 as 4 frequências naturais do protótipo, cada uma delas possui um modo de vibração de flexão diferente. A Tabela 2 organiza os modos de vibrações e suas receptivas frequências de excitação.

Tabela 2 – Valores dos modos de vibração de flexão

| Modo Vibração       | Frequência (Hz) | Amplitude (mm/s <sup>2</sup> ) |
|---------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1° Modo de Vibração | 2,148           | 0,3645                         |
| 2° Modo de Vibração | 6,445           | 1,304                          |
| 3° Modo de Vibração | 10,45           | 0,6581                         |
| 4° Modo de Vibração | 12,3            | 0,7662                         |

Fonte: Autoria própria (2019)

O Segundo modo de vibração possui a maior amplitude de vibração, que neste caso, é o ponto mais crítico para ocorrer uma falha, desde uma deformação no protótipo até o desmoronamento.

Isso em um caso real de um abalo sísmico em um prédio, podendo levar uma catástrofe gigantesca, como é visto esporadicamente nos noticiários. As consequências da falta de prevenção, pode levar a perda de centenas de vidas e milhões de dólares.

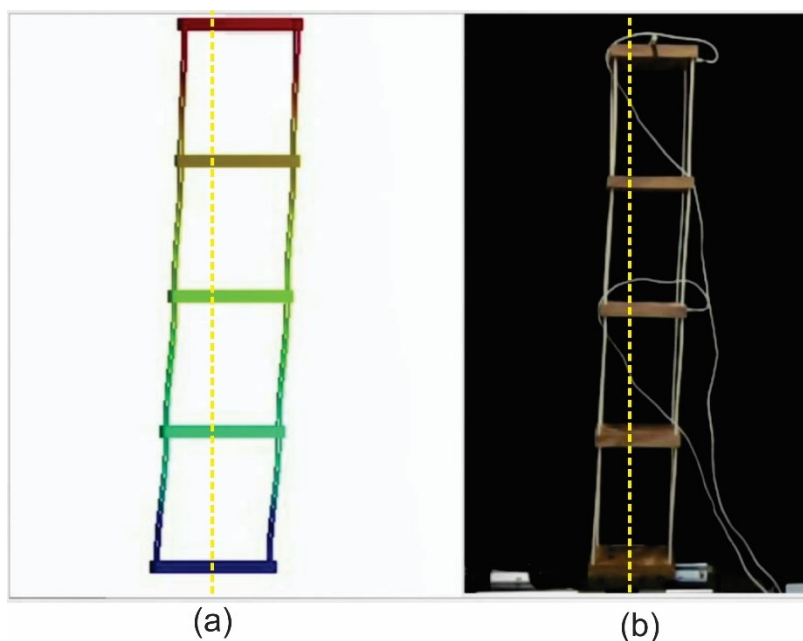
#### 4.2 MODOS DE VIBRAÇÕES

Foram realizadas simulações no programa Ansys, com intuito de realizar uma comparação dos modos de vibrações de flexão que foram obtidos pelo Ansys, e com imagens obtidas pelos experimentos da bancada didática.

As figuras 29 a 31, possuem linhas pontilhadas em amarelo, que servem para melhor ilustrar os deslocamentos dos pavimentos.

A Figura 29 ilustra a comparação do primeiro modo de vibração entre simulação na parte (a) e parte experimental na parte (b).

**Figura 29 – Comparação do primeiro modo de vibração (a) simulação e (b) experimento**

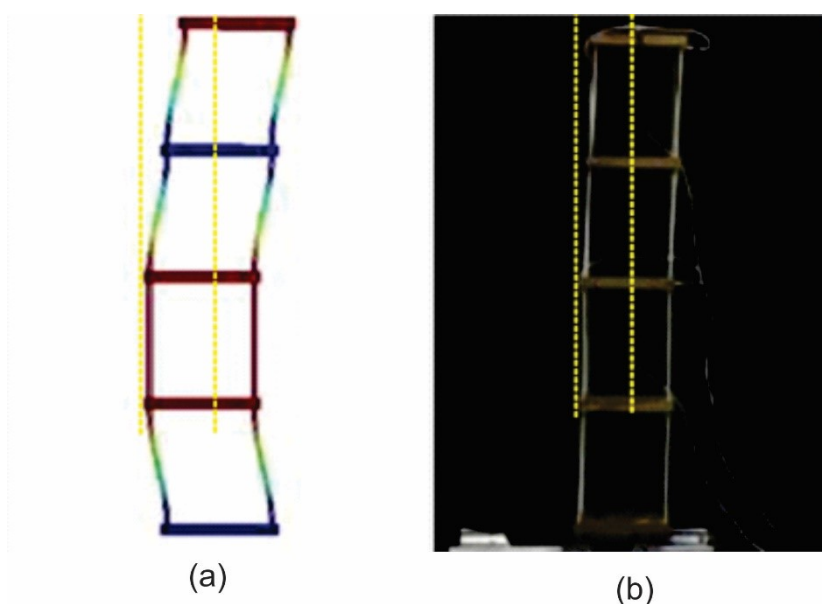


**Fonte: Autoria própria (2019)**

Observa-se que ambas as imagens estão com os mesmos deslocamentos dos pavimentos, e, o pavimento 5 possui a maior amplitude, e depois vem os pavimentos 4, 3, 2 e 1 sendo que, todos os pavimentos estão no mesmo sentido.

De maneira análoga a Figura 29 e a Figura 30, comparam a maneira que ocorre a vibração do segundo modo de vibração da simulação com o experimento.

**Figura 30 - Comparação do segundo modo de vibração (a) simulação e (b) experimento**

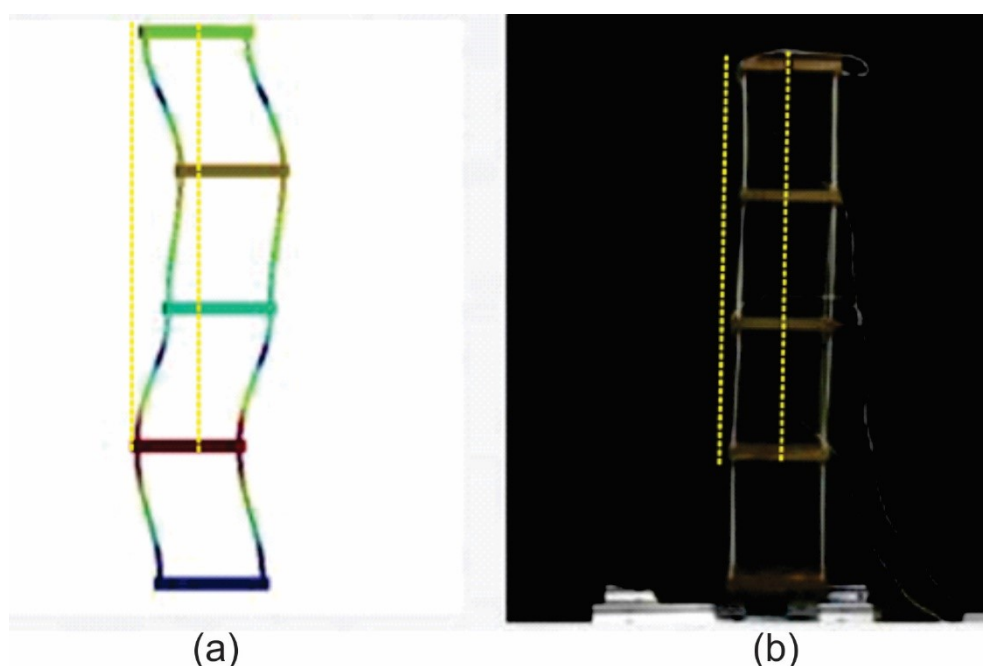


**Fonte: Autoria própria (2019)**

Nota-se que no segundo modo de vibração, os pavimentos 2 e 3 estão deslocados de maneira oposta ao pavimento 5. O pavimento 4 está imóvel durante a vibração, isso é devido ele se encontrar em um ponto nodal, assim seu deslocamento é nulo neste modo de vibração.

A Figura 31 ilustra o terceiro modo de vibração, e seus respectivos deslocamentos dos pavimentos.

**Figura 31 - Comparação do terceiro modo de vibração (a) simulação e (b) experimento**



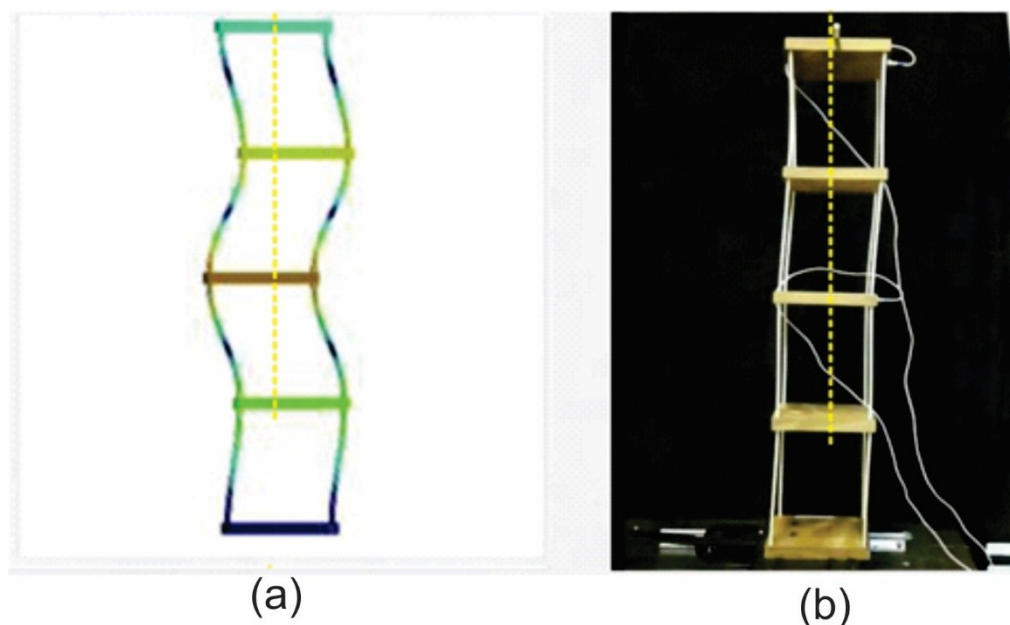
**Fonte: Autoria própria (2019)**

Pela Figura 31 conclui-se que os pavimentos 2 e 5 estão se deslocando no mesmo sentido com amplitudes semelhantes, e ambos estão opostos ao movimento dos pavimentos 3 e 4.

Os pavimentos 3 e 4 estão no mesmo sentido de movimentação, porém o pavimento 4 possui uma amplitude maior que o pavimento 3.

O quarto modo de vibração do protótipo, ilustrado pela Figura 32, demonstra que os pavimentos 2 e 4 se movimentam no mesmo sentido e com amplitudes semelhantes. De maneira análoga, os pavimentos 3 e 5 se movimentam, porém em sentidos contrários aos pavimentos 2 e 4.

Figura 32 - Comparação do quarto modo de vibração (a) simulação e (b) experimento



Fonte: Autoria própria (2019)

Com as Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32 conseguimos concluir que os modos de vibrações são muito semelhantes na simulação pelo o Ansys se comparando com a parte experimental.

Com isso a bancada didática com o protótipo deixa a compressão dos modos de vibração muito mais fácil, pois assim os alunos conseguem ver os modos de vibrações de uma maneira dinâmica e interativa. Isso gera um aumento de interesse pelo conteúdo desenvolvido em sala de aula, resultando em uma maior absorção do conhecimento pelo aluno.

#### 4.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÃO (ADV)

Esse tópico possui o objetivo de apresentar os resultados dos experimentos com ADV, com isso demonstrar suas características e aplicabilidade.

Os comprimentos L1 e L2 descritos posteriormente, levam em consideração a espessura dos blocos de aço utilizados, e suas distâncias são contabilizadas a partir do centro de massa dos blocos.



### 4.3.1 ADV Com o Pêndulo 1

No primeiro experimento com intuito de minimizar a vibração da ressonância do primeiro modo, colocamos apenas o pêndulo 1, o qual é responsável pela absorção da vibração neste caso. Os parâmetros que foram buscados a ser utilizados no experimento estão listados na Tabela 3.

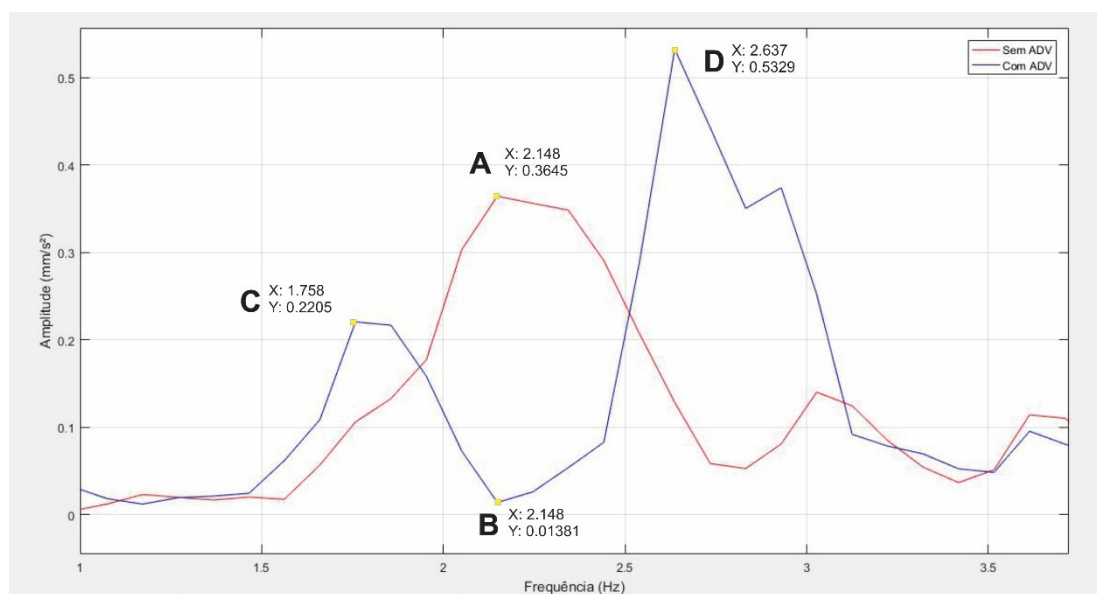
**Tabela 3 – Dados do experimento com pêndulo 1**

| Dados  | Valores  |
|--|----------|
| Massa do Protótipo (m)                                   | 2857 g   |
| Massa do Pêndulo 1 (ma1)                                 | 168,7 g  |
| Comprimento Pendulo (L1)                                 | 53,8 mm  |
| Amplitude de Vibração                                    | 1,2 mm   |
| Frequência Natural do 1º Modo de vibração ( $\omega_p$ ) | 2,148 Hz |
| Razão das Massas ( $\mu_1$ )                             | 0,06     |
| Fator de Sintonização ( $\beta_1$ )                      | 1        |
| Frequência de Excitação Normalizada (r1)                 | 1        |

Fonte: Autoria própria (2019)

Com esses parâmetros da Tabela 3, obtiveram-se as curvas FRFs para esse caso, o qual está ilustrado pela Figura 33.

**Figura 33 – Gráfico de comparação da FRF do protótipo com o pêndulo 1 e sem o pêndulo**



Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que aplicação do ADV por meio do pêndulo 1, gerou dois novos picos de amplitudes, representados pelos pontos C e D, e esse efeito é denotado de antirressonância.

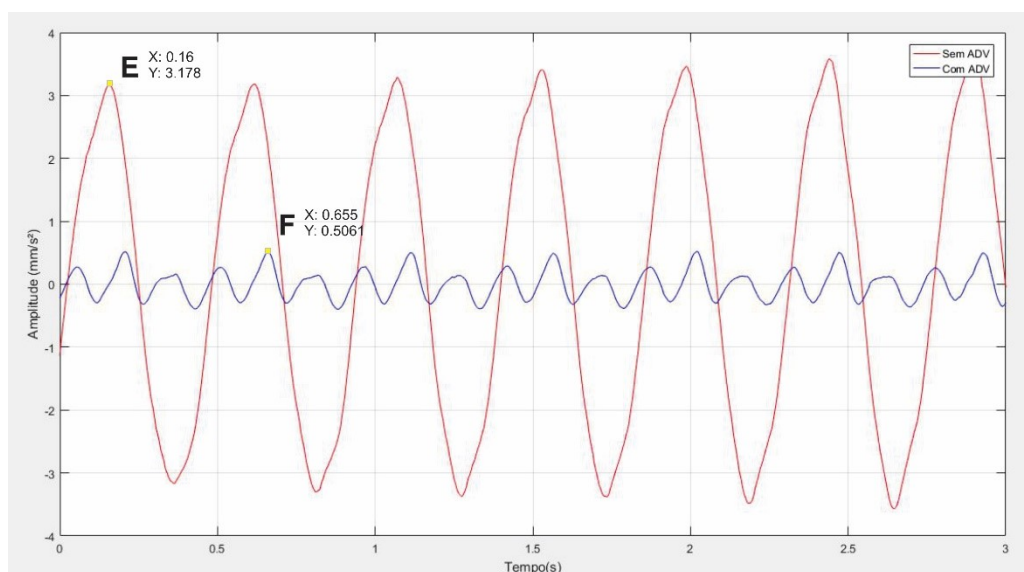
No ponto C a amplitude de vibração é menor que no ponto A, enquanto que o ponto D é maior.

Nota-se que o ponto B tem-se a menor amplitude de vibração, o qual está localizado na mesma frequência do ponto A. isso é reflexo de uma ótima sintonização da frequência natural do pêndulo com a do protótipo e implica que realmente o  $\beta_1 = 1$ .

O resultado da diferença em relação a amplitude de vibração da aplicação do ADV na frequência de excitação do primeiro modo é representado pela Figura 34.

A Figura 34 representa os resultados da aplicação ou não aplicação do ADV no primeiro modo vibração, considerando o parâmetro de amplitude.

**Figura 34 - Amplitude em função do tempo do protótipo com o pêndulo 1 e sem o pêndulo**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

O ponto E representa a amplitude máxima do protótipo sem ADV, enquanto o ponto F a amplitude máxima com ADV.

Visualmente pela Figura 34, há uma enorme diferença de amplitude para os dois casos, em termos de porcentagem o uso do ADV representa aproximadamente uma redução de oitenta e quatro por cento do valor da amplitude sem o ADV, isso para as condições aplicadas neste tópico.

#### 4.3.2 ADV Com o Pêndulo 1 e Pêndulo 2 Simultaneamente.

Análogo ao tópico anterior, porém com dois pêndulos ao invés de apenas um, o objetivo desse tópico é apresentar os resultados obtidos através de dos pêndulos 1 e 2 simultaneamente, um em cada lado do protótipo, conforme está ilustrado na Figura 24.

Os parâmetros que foram buscados a serem utilizados no experimento, estão listados na Tabela 4.

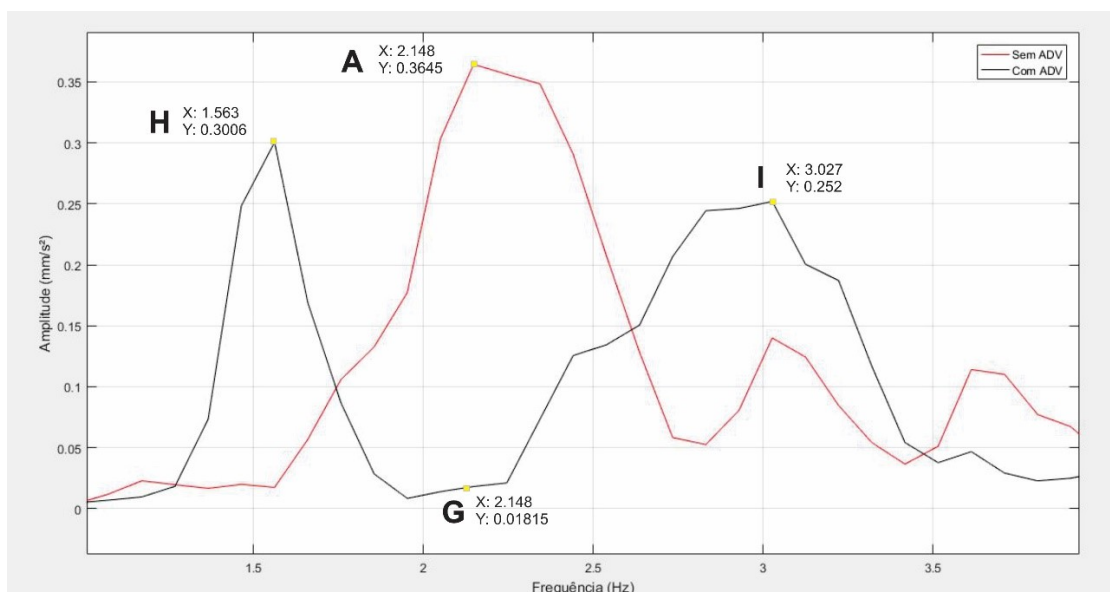
**Tabela 4 - Dados do experimento com o pêndulo 1 e o pêndulo 2 simultaneamente**

| Dados  | Valores  |
|--|----------|
| Massa do Protótipo (m)                                   | 2857 g   |
| Massa dos Pêndulos Somados (ma2)                         | 286,7 g  |
| Comprimento Pendulo (L2)                                 | 53,8     |
| Amplitude de Vibração                                    | 1,2 mm   |
| Frequência Natural do 1º Modo de vibração ( $\omega_p$ ) | 2,148 Hz |
| Razão das Massas ( $\mu_2$ )                             | 0,1      |
| Fator de Sintonização ( $\beta_2$ )                      | 1        |
| Frequência de Excitação Normalizada (r2)                 | 1        |

Fonte: Autoria própria (2019)

Com esses parâmetros da Tabela 4, obtiveram-se as curvas FRFs para esse caso, do qual está ilustrado pela Figura 35.

**Figura 35 - Gráfico de comparação da FRF do protótipo com os dois pêndulos e sem os pêndulos**



Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que aplicação do ADV neste caso, gerou novamente dois novos picos de amplitudes representados pelos pontos H e I, os quais ambos possuem menor amplitude que o ponto A, isso é benéfico em partes, pois mesmo gerando dois novos pontos de ressonância, temos zonas menos críticas que no caso de não se utilizar um ADV.

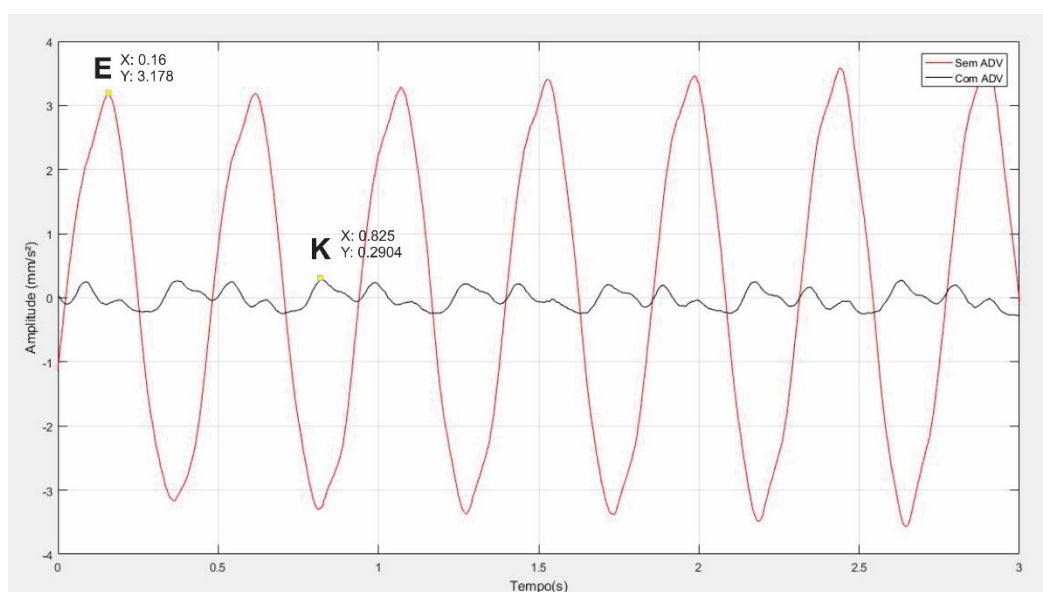
Observa-se que o ponto G não é o menor ponto de amplitude para a curva com ADV, isso pode ser o resultado de uma má aplicação dos comprimentos dos barbantes dos dois pêndulos, pois objetivo era ter  $\beta=1$ , isso seria facilmente corrido que ambos os pêndulos fossem um corpo rígido.

Quando o temos o fator de sintonização  $\beta=1$ , temos um caso semelhante ao tópico anterior, que o ponto mínimo da amplitude da aplicação do ADV corresponde a mesma frequência do ponto máximo da ressonância sem ADV.

Além da questão do possível pequeno equívoco do comprimento L aplicado, há também o fator que, com aumento da massa do pêndulo 2 acrescentado no sistema, pode ter ocorrido uma pequena mudança no valor da frequência natural do primeiro modo de vibração, e assim resultando nessa pequena alteração.

Mesmo assim a utilização dos dois pêndulos simultaneamente, resultou em uma amplitude de vibração menor que o caso anterior, conforme ilustrado na Figura 36.

**Figura 36 - Amplitude em função do tempo do protótipo com os dois pêndulos e sem os pêndulos**



Fonte: Autoria própria (2019)

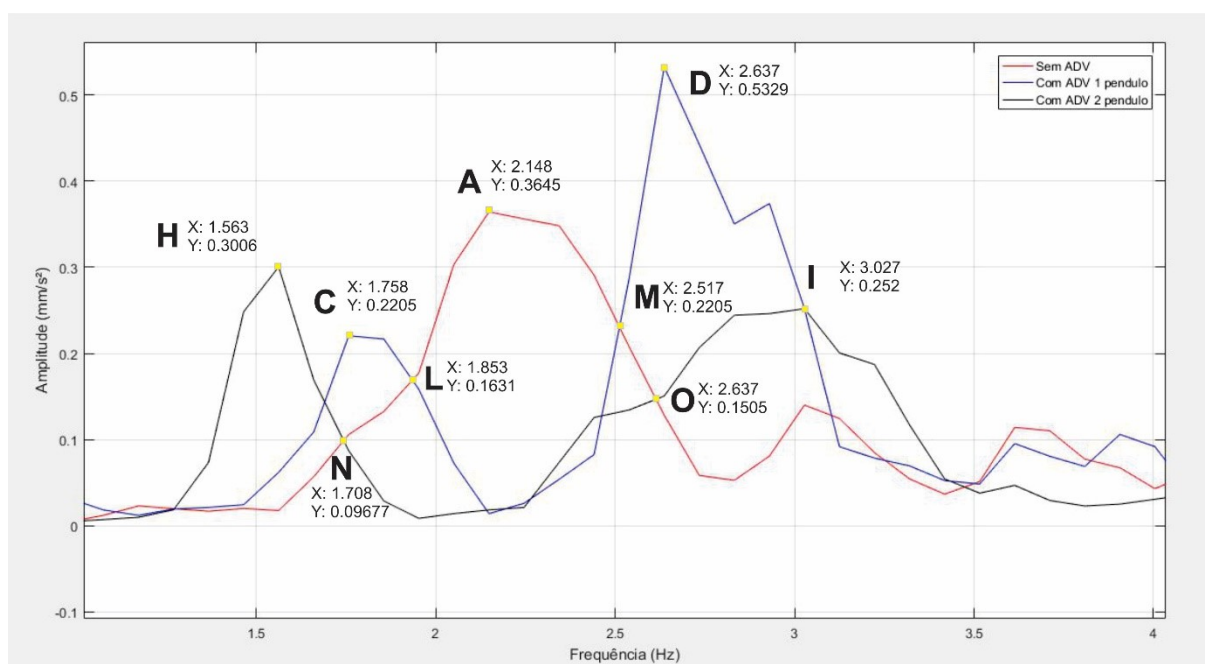
O ponto E representa a amplitude máxima do protótipo sem ADV, enquanto o ponto K a amplitude máxima com ADV.

Neste caso em termos de porcentagem, o uso do ADV representa aproximadamente uma redução de noventa e um por cento do valor da amplitude sem o ADV, e se comparado com o experimento descrito anteriormente representa uma redução de aproximadamente quarenta e oito por cento.

#### 4.3.3 Comparação de Resultados dos ADVs em Relação da Razão das Massas.

A Figura 37 ilustra as curvas FRF dos dois casos da aplicação do ADV, e também a curva para o caso do protótipo sem o ADV.

**Figura 37 - Gráfico de comparação da FRF do protótipo dos dois experimentos**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

Sabe-se que, quanto menor razão das massas  $\mu$ , mais estreita fica a banda operacional do ADV, através dos pontos L, M, N e O da Figura 37, onde podemos verificar essa característica.

Os pontos L e M, são os pontos que delimitam a faixa de atuação do ADV com o pêndulo 1. A razão de massas deste caso é  $\mu_1=0,06$ .

Enquanto os pontos N e O, são os pontos que delimitam a faixa de atuação do ADV com o pêndulo 1 e 2 simultaneamente, e a razão de massas deste caso é  $\mu_2=0,1$ .

Devido  $\mu_1$  ser menor que  $\mu_2$ , a banda operacional do ADV com o pêndulo 1 e 2 simultaneamente é expressivamente maior, conforme ilustrado na Figura 37. Isso em termos de porcentagem, representa aproximadamente um aumento quarenta por cento da banda operacional do ADV.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com o escopo primariamente estipulado para a execução deste trabalho, o qual abrangia o desenvolvimento de uma bancada didática com intuito de aplicar conceitos e técnicas na área de absorvedores dinâmicos de vibração, análise modal e modos de vibração. Pode-se enunciar que os objetivos propostos foram atingidos.

Através da bancada didática foi obtido a simulação do abalo sísmico esperado, que constituía fixação de um protótipo de um prédio, e uma excitação da base controlada em várias frequências, o qual conseguiu o objetivo de atingir as frequências naturais da estrutura ensaiada.

Com a análise modal experimental, foram obtidas todas frequências naturais do protótipo. Através das obtenções das frequências naturais, se aplicou exatamente os parâmetros necessários para aplicação do ADV, e com isso resultando em uma redução expressiva da simulação dos abalos sísmicos.

Foram obtidos todos os modos de vibração de flexão do protótipo, o qual permitirá uma visualização e compressão mais clara aos alunos.

A aplicação do ADV, resultou em reduções de oitenta e quatro por cento para o experimento descrito no item 4.3.1, e noventa e um por cento para o experimento do item 4.3.2.

## 5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Melhorias no sistema de controle de amplitude da bancada didática.
- Realização de experimentos de abalos sísmicos, utilizando a bancada didática em estruturas metálicas.
- Realização de experimentos em uma gama maior dos parâmetros razão das massas  $\mu$  e fator de amortecimento  $\zeta$ , com objetivo de acentuar as curvas FRF.
- Realização de experimentos utilizando outros tipos de ADVs, para efeito de comparação.



## REFERÊNCIAS

ALVES, Lorena. **Controle de vibrações em edifícios altos sujeitos a vento ou terremoto**. 133 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

BARDINE, Renan. **Placas Tectônicas**. Disponível em: <<https://www.colaweb.com/geografia/placas-tectonicas>> Disponível em Acesso em: 20 de set. 2018.

INPE, **Uma Discussão Sobre Os Efeitos Dos Modos De Vibração Indesejados Sobre O Controle Da Atitude De Um Satélite**. São José dos Campos: Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, 2012.

INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2013.

LEME, Leandro. **Estudo Comparativo de Técnicas de Análise Modal Experimental no Domínio da Frequência em uma Barra na Condição de Contorno Livre-Livre**. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MARQUES, Rodrigo. **Estudo Teórico E Numérico De Absorvedores Dinâmicos De Vibrações Ativos E Adaptativos**. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

MUÑOZ, Paulo. **Análise Dinâmica Não Linear de Pórticos com Base Elasto-plástica sob Ação Sísmica**. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015..

PARISENTI, Ronaldo. **Estudo de Análise Dinâmica e Metodológica da NBR 14421 Para Projetos de Edifícios Submetidos a Sismos**. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SANTOS, Joycemary. **Revisão Bibliográfica Sobre Ocorrências De Abalos Sísmicos No Brasil**. 32 f, Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Licenciatura em Geografia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

SCHWARZ, Brian. J.; RICHARDSON, Mark. H. Experimental Modal Analysis. In: CSI Reliability Week, 1999. **Proceedings**: Jamestown, Califórnia, 1999.



