

**DESENVOLVIMENTO DE INFRA – ESTRUTURA PARA
ATIVIDADE DE ENSINO E PESQUISA EM ANÁLISE MODAL**

RELATÓRIO TÉCNICO CIENTÍFICO

São Paulo 2015

AGRADECIMENTOS

Ao Fundo de apoio à pesquisa Mackpesquisa, na pessoa de seu presidente e dos funcionários em especial ao Sr. Danilo Dupas, Sr. Edivaldo Ferreira Cavalcante e Geisa Carina Silva Coelho.

Aos técnicos dos laboratórios de usinagem da Escola de Engenharia.

Ao Departamento de compras do Instituto Presbiteriano Mackenzie.

Ao Departamento de manutenção da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	4
2	ASPECTO DO LABORATÓRIO E ADEQUAÇÃO	6
2.1	Construção da mesa inercial	7
2.2	Cálculo das frequências de ressonância	9
2.3	Início dos testes com novos equipamentos	13
3	EXPERIMENTO INICIAL – PREPARAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS	16
3.1	Exemplo comentado para uma experiência introdutória em análise modal	17
4	ELABORAÇÃO DA EMENTA PARA A DISCIPLINA ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	33
4.1	Apresentação da ementa ao núcleo estruturante	38
5	ANÁLISE DA ADAPTABILIDADE DO LABORATÓRIO PARA ATENDER A PROPOSTA	43
6	CONCLUSÕES	44
7	BIBLIOGRAFIA	47

1 - Introdução e justificativas

A análise modal é uma ferramenta que foi desenvolvida para estudar o comportamento de estruturas sob excitação vibracional, tendo em vista que as vibrações mecânicas nos meios estruturais interferem no seu desempenho e na sua resistência. O termo análise modal é usado ao processo de extração de parâmetros mecânicos a partir de dados experimentais. Ela busca medir e analisar a resposta dinâmica das estruturas quando expostas a oscilações mecânicas, podendo ser classificada como um processo computadorizado que busca identificar frequências naturais e formas modais. Isso é conseguido, por meio de *softwares* que calculam e apresentam os resultados graficamente. Outra aplicação da análise nodal experimental é a validação de modelos teóricos fornecidos por métodos numéricos, onde pode-se citar o processo que utiliza a metodologia dos elementos finitos. Lieven e Ewins (2001) resumem a análise modal como:

Após 30 anos de desenvolvimento, a análise modal experimental já está estabelecida como uma técnica fundamental para a compreensão do comportamento de vibração das estruturas. A aplicação da análise modal está na base da modelagem teórica e prática da *performance* dinâmica estrutural. Embora os princípios básicos são conhecidos há muitos anos, só recentemente é que um desenvolvimento rápido e amplo de novos métodos levou a sua utilização generalizada e aplicação. "

A Análise Modal Experimental (AME) compreende a medição das funções de resposta em frequência (FRFs), utilizando diversas técnicas e configurações, tipos de ensaios, que permitem extrair os parâmetros modais de uma estrutura (frequências naturais, amortecimentos e modos de vibrar). Por essência, um experimento modal compreende a medição de um conjunto de funções de resposta em frequência. Estes são geralmente medidos como registros em função do tempo (Ewins 1984). Técnicas mais apuradas, tomaram forma após o desenvolvimento, em grande escala, de computadores com capacidade de processamento elevada e mecanismos de armazenamento sofisticados. As metodologias para o estudo de sistemas estruturais mais difundidas são:

1 - **Método de Elementos Finitos, Elementos Infinitos e Elementos de Contorno**, onde, nesses casos, o sistema estrutural é dividido em pequenos elementos e a solução numérica da equação é resolvida satisfazendo condições de contorno entre as fronteiras dos elementos e as fronteiras externas. 2 – **Método de Análise Estatística de Energia (SEA)**, que descreve o comportamento de cada sub-sistema de um sistema mais complexo por meio do cálculo das somas de energia de entrada, de saída e energia perdida em cada sub-sistema (GERGES.2000). 3 - **Forma de Deflexão Operacional, Operating Deflection Shape (ODS)**, ou ainda, análise modal operacional (**OMA**), que permite a obtenção de parâmetros modais utilizando apenas os dados de resposta da estrutura. Isso difere da técnica clássica onde, a excitação não necessita ser medida, sendo que a estrutura é excitada pelas próprias condições de operação. Essa abordagem é bastante utilizada em equipamentos que não podem ser desmontados, movidos ou retirados de sua operação.

Verifica-se que a necessidade no estudo e em experimentos em análise modal é crescente, devido aos trabalhos publicados, principalmente em trabalhos de conclusão de curso e congressos dirigidos à iniciação científica. Trabalhos antigos já abordavam o tema análise modal experimental, como descrito por Gasparetto (2006), atualmente trabalhos com viés experimental são apresentados em congressos, isso pode ser visto em Ueta (2015) que aborda maneiras para experimentos em vibrações mecânicas com o uso de softwares para validação. Outro trabalho que busca o envolvimento com práticas de laboratório, proposta por alunos, pode ser vista em Heirich et.al (2013), onde o tema central é a proposição de um laboratório que atenda aos conceitos teóricos. A proposta da inclusão de uma disciplina em análise modal, justifica-se, não só pela sua importância, mas pela profundidade do tema, que pode ser aplicado em várias situações, como pode ser constatado no trabalho de Vasconcelos (2009), lá ele utiliza análise modal em um material compósito. Raia et. al (2011) descreve processos para a obtenção de frequências modais utilizando planilhas, calculadoras e *softwares* específicos. Com vistas ao trabalho de laboratório, trabalhos de mestrado e doutorado também abordam o assunto, Lima (2006), constrói um sistema semelhante ao apresentado nesse trabalho e explora alguns conceitos de excitação com martelo de impacto. Borges (2006), mostra um processo didático para a obtenção da resposta em frequência, bastante semelhante ao apresentado no presente trabalho.

2 – Aspecto do laboratório e adequação

O Laboratório de vibrações mecânicas se encontra instalado no prédio 33 térreo com uma área de 14,0 m². Atualmente ele atende as turmas de Mecânica vibratória I e Mecânica vibratória II, num total de 130 alunos. As práticas são demonstrativas e qualitativas. Atualmente, após sucessivos investimentos via departamento e pedidos de subvenção, além de algumas doações, o laboratório possui os seguintes equipamentos:

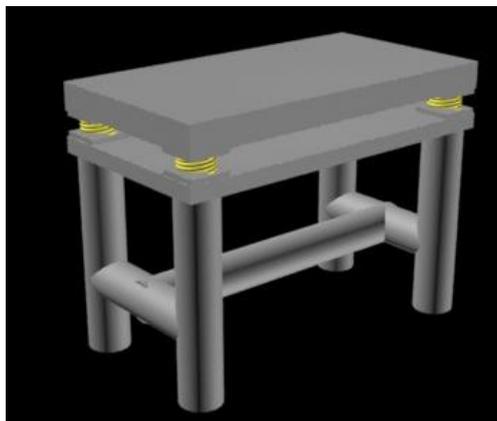
Um amplificador de potência 450,0 Wrms modelo PA-138 Labworks Inc.
Um condicionador de sinais modelo 480C PCB PIEZOELETRONICS;
Um *shaker* eletrodinâmico modelo ET -132 Labworks Inc;
Três acelerômetros modelo 353B03 PCB PIEZOELETRONICS;
Uma fonte de alimentação de uso geral para tensões: -15,0V +15,0V +5,0V;
Uma fonte de alimentação de uso geral para tensões: -25,0V +25,0V ;
Um sistema de aquisição de dados Lynxtec, mod. ADS2000, 32 canais;
Um martelo de impacto mod. PCB 34758;
Uma mesa estruturada com massa suspensa;
Dois acelerômetros tipo MEMs – ADXL335;
Transdutor de força PCB modelo 208C03;
Um gerador de sinal Minipa mod. MFG-4202;
Um osciloscópio tektronix mod. TDS 210 – 60 MHz;
Um multímetro digital minipa mod. ET2051;
Um multímetro analógico Phywe mod. 0703400;
Um inversor de frequência ;
Um Motovibrador Vimot, Mavi mod 10;
Dois acelerômetros Teknikao mod.NK20;
Um pacote de *software* para aquisição de dados AqDados v7.0 Lynx;
Um pacote de *software* para análise de sinais e FFT Aqanalysis;
Um tacômetro óptico ICEL, mod. TC5010;
Um LVDT HBM mod.152810101;
Um sensor de deslocamento potenciométrico LSC;
Um calibrador para acelerômetro;
Célula de carga Sodmex 500,0 kgf;
Célula de carga Sodmex 5,0 kgf.

O laboratório possui um armário com os equipamentos de aquisição, um armário com os sensores e equipamentos de medida. Duas mesas servem aos experimentos, sendo que uma possui tampo de granito polido e outra com tampo de concreto com estrutura de aço apoiada em uma suspensão.

A mesa de concreto foi concebida para atender aos experimentos de análise modal e outros. Sobre ela, existem encaixes rosqueáveis capazes de realizar a fixação de modelos sob teste.

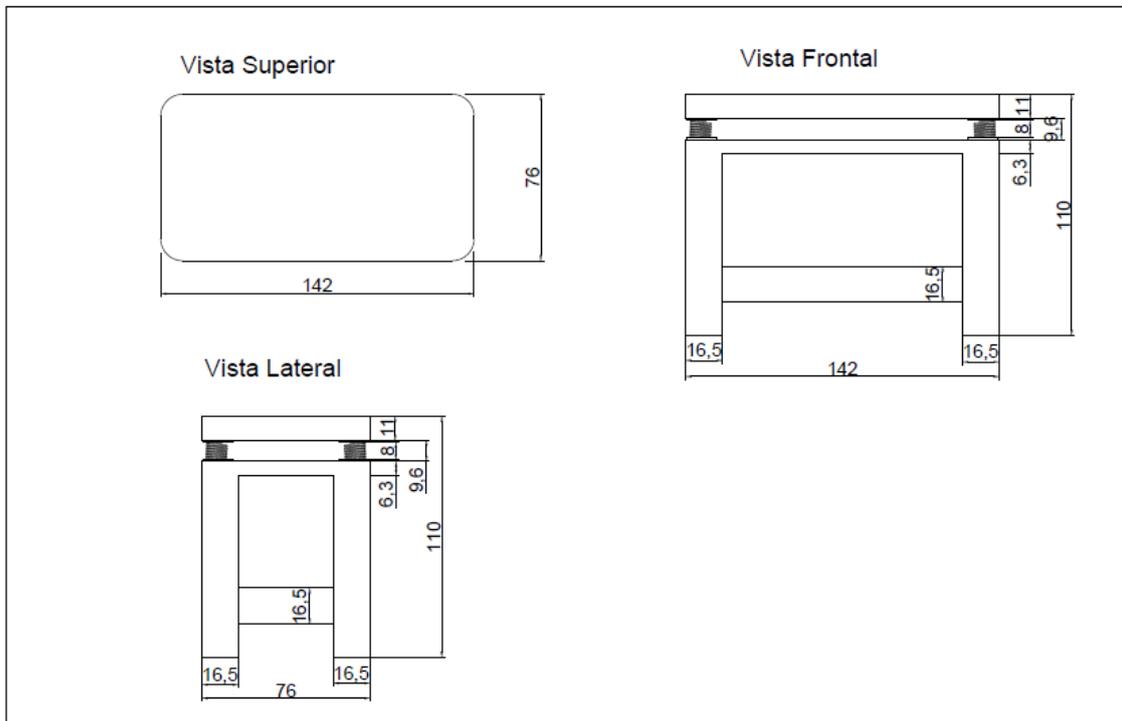
2.1 Construção da mesa inercial

Para execução dos testes e experimentos em análise modal, foi construída uma bancada composta por uma mesa, em concreto, apoiada sobre quatro molas, estas por sua vez, apoiadas em uma estrutura feita com tubos de aço de diâmetro 165,0 mm, soldados com soda MIG¹. O desenho 1 mostra a concepção do projeto, onde são destacadas as molas e uma massa suspensa (mesa) construída com a finalidade de isolar os experimentos das perturbações provenientes do solo. A mesa de concreto de 315,0 kg foi apoiada sobre uma chapa de aço de massa 42,0 kg, que por sua vez foi apoiada sobre 4 molas com constante elástica, individual de $k = 20000,0$ N/m, caracterizaram o conjunto com uma frequência natural $\omega = 15,0$ rad/s (14,96 rad/s). A estrutura tubular possui parafusos de ajuste que garantem o nivelamento do conjunto. Sobre a mesa foram fixados guias com rosca para fixação de modelos, dispositivos ou equipamentos. Além disso, possui ajuste de nível em todos os pés. A fotografia 1 mostra a bancada acabada e o desenho 2 detalha a planta com as três vistas.



Desenho 1. Vista isométrica da mesa em 3D que compõe a bancada de testes.

¹ Soldagem por arco elétrico com gás de proteção, sigla **MIG** – **Metal Inert Gas** trata-se de um processo de soldagem por arco elétrico entre a peça e o consumível em forma de arame.



Desenho 2. Projeto da bancada de testes em três vistas. As medidas em milímetros.

As fotografias 1a e 1b, mostram as vistas da bancada com o aspecto final, após a construção, bem como a mesa apoiada sobre molas. Pode-se observar os encaixes, sobre



Fotografia 1a. Vista frontal

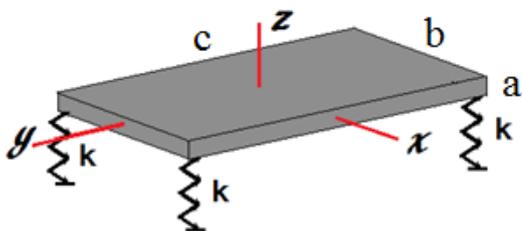
Fotografia 1b. vista lateral

o tampo, onde serão fixados os modelos para teste. A altura da mesa foi calculada de modo a atender os aspectos ergonômicos de postos de trabalho² previstos na norma regulamentadora 17 – NR17.

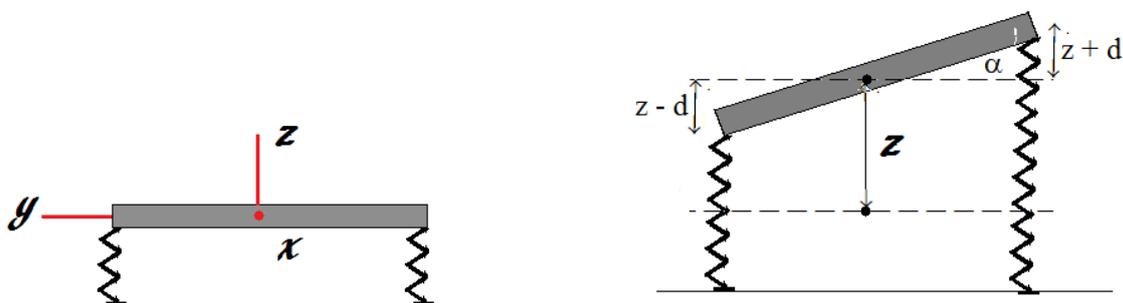
²Manual do ministério do trabalho podendo ser encontrada em : http://www2.mte.gov.br/seg_sau/pub_cne_manual_nr17.pdf

2.2 Cálculo das frequências de ressonância

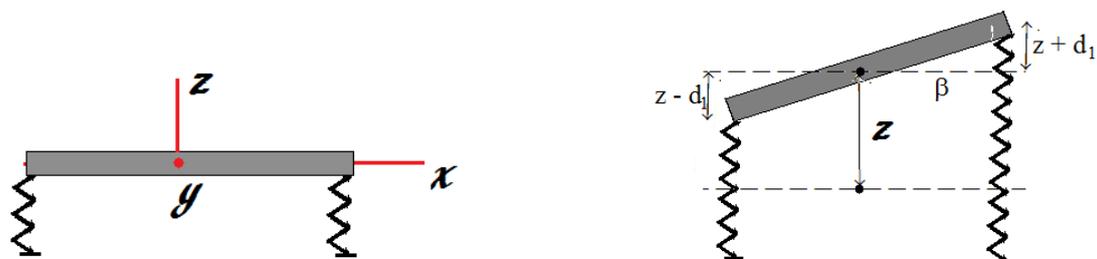
A massa suspensa – mesa ou tampo – pode ser modelada como um sistema com três graus de liberdade. Na direção de “z”, rotacionando em relação a “x” com inclinação α e rotacionando em relação a “y” com inclinação β . Variáveis em função do tempo $z(t)$, $\alpha(t)$ e $\beta(t)$.



Desenho 3. Vista isométrica da placa apoiada em molas de rigidez k e os eixos coordenados.



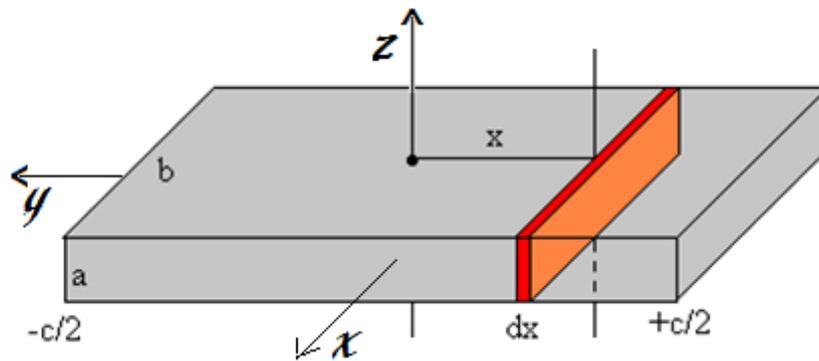
Desenho 4. Deslocamento da placa na direção z , rotacionando no sentido anti-horário, segundo x , de um ângulo α .



Desenho 5. Deslocamento da placa na direção z , rotacionando no sentido anti-horário, segundo y , de um ângulo β .

O momento de inércia da placa, desenho 6, pode ser calculado, utilizando-se o teorema de Steiner, onde um elemento da placa, de espessura dx com lados a e b , estabelece que:

$$I = \frac{b^2}{12} dm . \quad 1$$



Desenho 6. Cálculo do momento de inércia de uma placa (paralelepípedo) em função do eixo de simetria.

Momento de inércia da placa em função de um eixo paralelo situado a uma distância x .

$$\frac{1}{12} b^2 dm + x^2 dm = \left(\frac{1}{12} b^2 + x^2 \right) \frac{M}{abc} ab \cdot dx = \left(\frac{1}{12} b^2 + x^2 \right) \frac{M}{c} dx \quad 2$$

Que resulta em :

$$\int_{-c/2}^{c/2} \left(\frac{1}{12} b^2 + x^2 \right) \frac{M}{c} dx = \frac{M}{12} (b^2 + c^2) \quad 3$$

Cujo valor numérico é: $I = 6016,0 \text{ kgm}^2$

Utilizando o modelamento como um sistema de três graus de liberdade, visto pelos eixos “x” e “y”, extraindo os autovalores de acordo com a expressão:

$$\det([m](-\omega^2) + [k]) = 0 \quad 4$$

$$\left| \left(\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} (-\omega^2) + \begin{bmatrix} 4k & 0 & 0 \\ 0 & kc^2 & 0 \\ 0 & 0 & kb^2 \end{bmatrix} \right) \begin{pmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \right| = 0 \quad 5$$

$$\left(\begin{bmatrix} 357 & 0 & 0 \\ 0 & 78 & 0 \\ 0 & 0 & 78 \end{bmatrix} (-\omega^2) + \begin{bmatrix} 4(20000) & 0 & 0 \\ 0 & (20000)(1,42)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 20000(0,76)^2 \end{bmatrix} \right) \begin{pmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = 0 \quad 6$$

Resolvendo, se obtém a equação característica:

$$-\omega^6 + 966,14\omega^4 - 254251,32\omega^2 + 19705449,56 = 0 \quad 7$$

Cujos autovalores são:

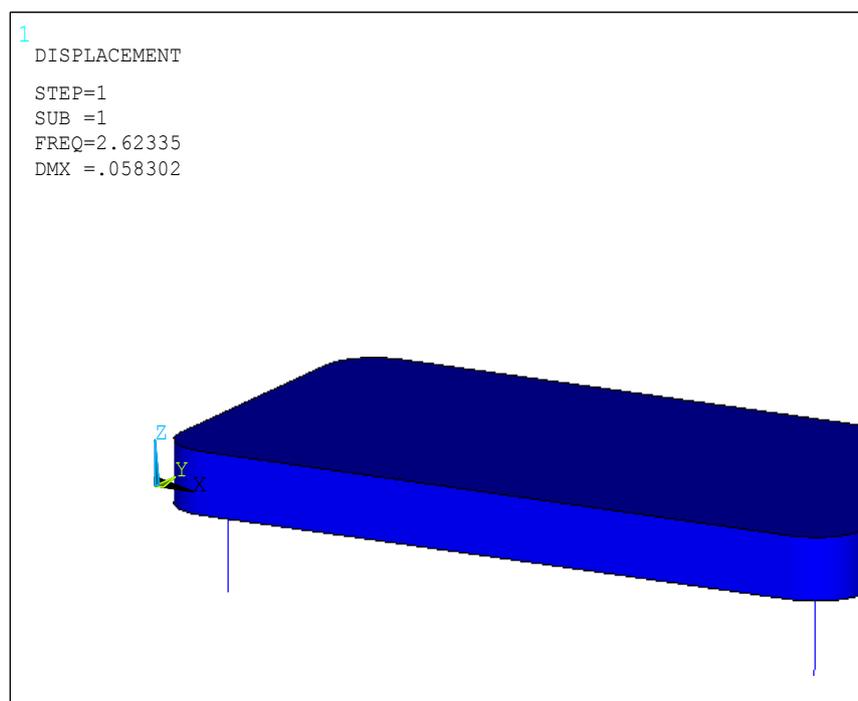
$$\omega_1 = 15,0 \frac{rad}{s}, \omega_2 = 12,2 \frac{rad}{s} \text{ e } \omega_3 = 24,4 \frac{rad}{s} \quad 8$$

Que significam as frequências de ressonância da mesa, modelada com três graus de liberdade.

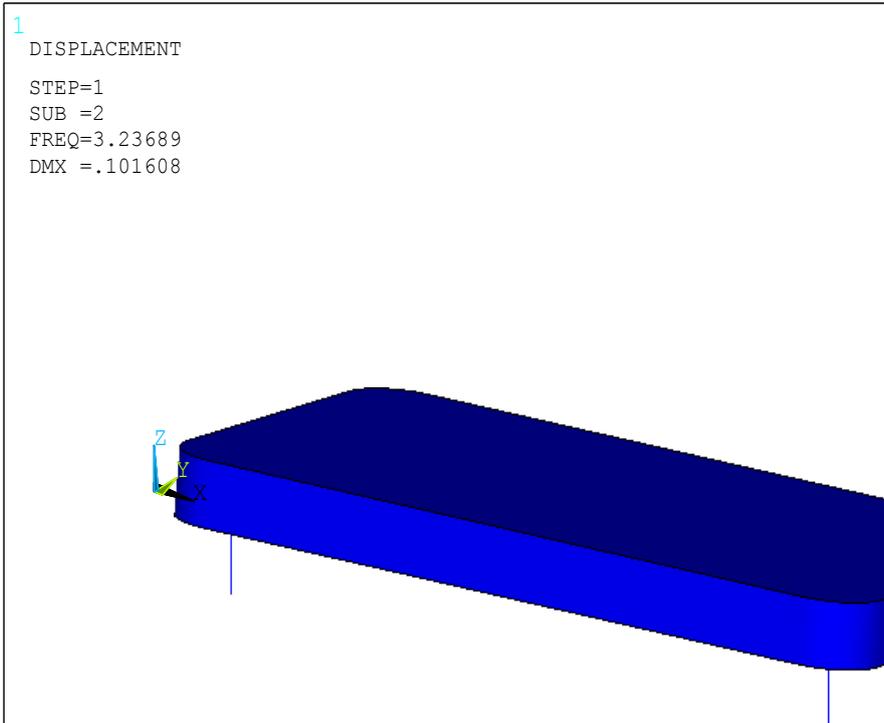
Se modelado com um grau de liberdade a frequência de ressonância é de 15,0 rad/s, semelhante àquela obtida como ω_1 , equação 8.

A modelagem, em elementos finitos, apresentou os mesmos valores caracterizando a confirmação do modelo analítico e numérico. Os desenhos 7, 8 e 9 mostram os modos de vibração e as respectivas frequências naturais.

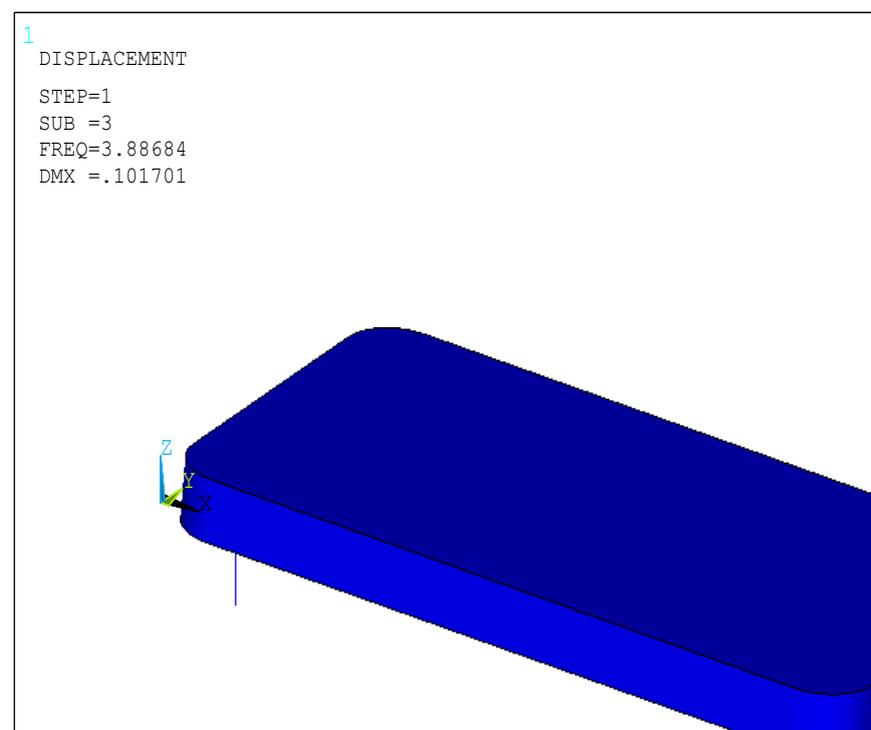
$$\omega_1 = 16,4 \frac{rad}{s}, \omega_2 = 20,2 \frac{rad}{s} \text{ e } \omega_3 = 24,4 \frac{rad}{s}$$



Desenho7. Modo vertical, semelhante aos desenhos 4 e 5.



Desenho 8. Primeiro modo lateral, relaciona-se com os desenhos 4 e 5.



Desenho 9. Segundo modo lateral, relaciona-se com os desenhos 4 e 5.

2.3 - Início dos testes com novos equipamentos

Martelo de impacto.

Praticamente, um teste com martelo de impacto teria, sobre a estrutura em teste um impulso perfeito, isto é, teria duração infinitamente pequena. Isto resultaria em uma amplitude constante no domínio da frequência. No entanto, esse impulso não é realizável e, em vez disso, obtém-se um contato finito. A duração deste intervalo está diretamente ligada aplicada. O martelo de impacto possui em sua extremidade de aço um sensor de força do tipo piezoelétrico, capaz de gerar um sinal elétrico no instante do impacto com a estrutura. A massa do martelo está ligada à energia que pode ser imposta à estrutura. Enquanto o martelo transfere energia, acelerômetros, dispostos regularmente sobre a estrutura, indicam comportamento dinâmico da mesma. Os sinais vindos dos sensores, tanto de força, como de aceleração são compostos matematicamente para gerar a curva de resposta modal. O mesmo procedimento pode ser adotado com um excitador eletrodinâmico ao invés do martelo.

A literatura indica três formas para realizar o teste:

- 1 – Colocar acelerômetros em todas as posições definidas sobre a estrutura e realizar uma batida excitação ou várias para se obter uma média. Apesar de ser a forma mais rápida, é a mais cara por conta da quantidade de acelerômetros colocados sobre a estrutura.
- 2 – Colocar um único acelerômetro em determinada posição e, em seguida, excitar sobre a estrutura em vários locais. Esse teste, em algumas situações, recebe o nome de teste do “martelo errante”. A vantagem é que utiliza poucos recursos, mas leva mais tempo para fazer as medições.
- 3 – Mudar o acelerômetro em várias posições e bater na estrutura em uma posição fixa. Essa metodologia recebe o nome de “acelerômetro errante”. O presente trabalho buscou essa solução.

Os *softwares* que foram utilizados são os mencionados acima, ou seja, Aqdados e Aqanalysis contando com o auxílio de um complemento para extrair a *Fast Fourier Transformer* (FFT) do sinal e realizar o espectro cruzado dos sinais. Esse *software* é responsável pela apresentação do espectro de frequência.

A determinação experimental da frequência de ressonância foi realizada como uma vibração livre amortecida. O acelerômetro foi colocado no centro da mesa e ela foi deslocada para baixo e solta. O decaimento foi gravado, com o sistema ADS 2000 e os cálculos estão descritos abaixo. O gráfico 1 mostra o comportamento da mesa, no tempo.

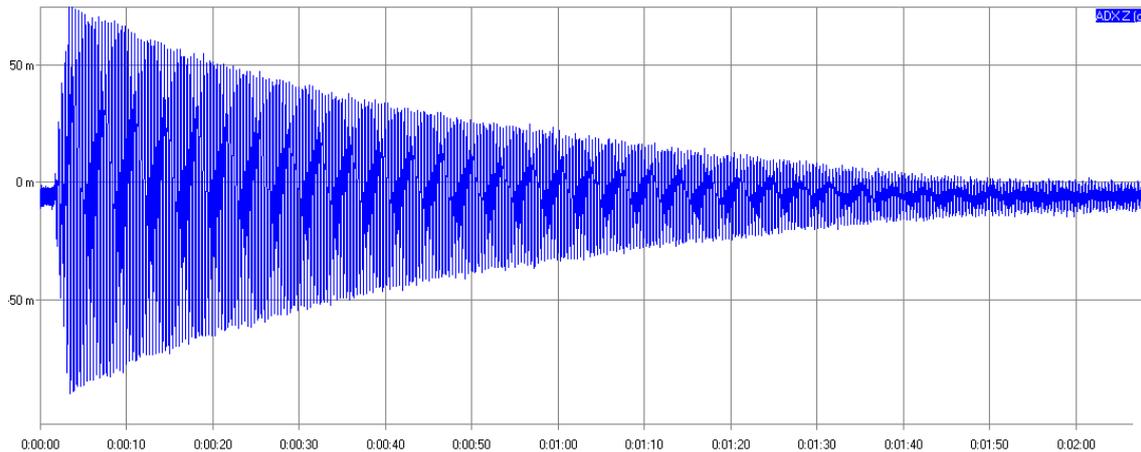


Gráfico 1. Aspecto temporal do decaimento que ocorre com vibração livre.

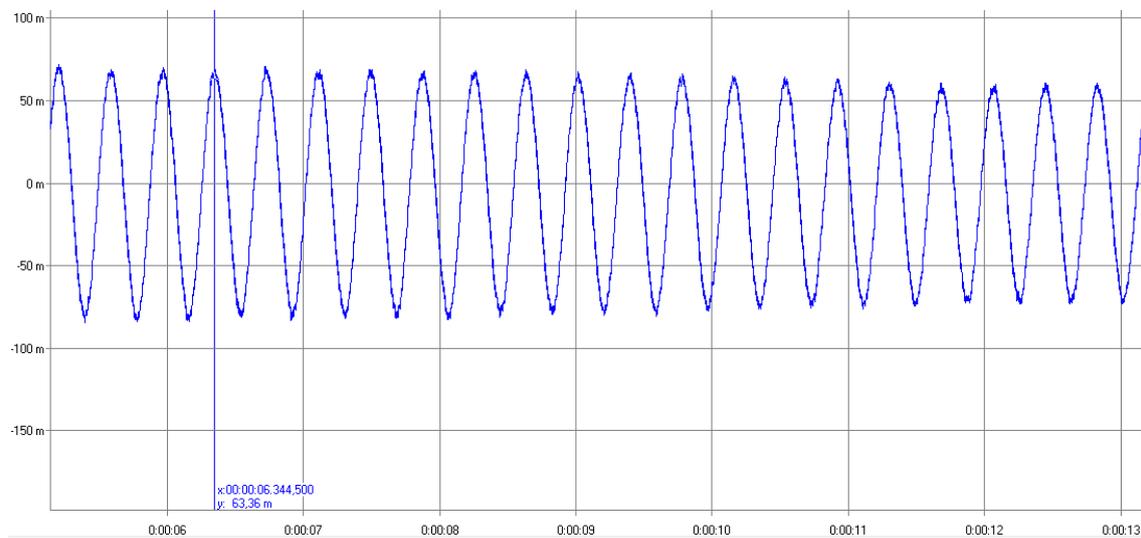


Gráfico 2. Detalhe do decaimento para extração de dados de amplitude e tempo.

A partir da indicação, mostrada no gráfico, tempo 6,334s e amplitude 63,66 mm para a primeira amplitude e dez oscilações após, 10,550s e amplitude de 61,82 mm.

$$\omega_a = 2\pi f_a \quad 9$$

$$\omega_a = \frac{2\pi}{\tau_a} = \frac{2\pi}{\frac{10,55 - 6,334}{10}} = 14,89 \text{ rad/s} \quad 10$$

$$\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \delta^2} \quad 11$$

$$\delta = \frac{\Delta}{\sqrt{4\pi^2 + \Delta^2}} \quad 12$$

$$\Delta = \frac{1}{10} \log \left(\frac{63,66}{61,82} \right) = 0,00347 \quad 13$$

$$\delta = 0,00055 \quad 14$$

$$\omega_n = 14,89 \text{ rad/s} \quad 15$$

Esse valor da frequência natural difere em menos de 10% do valor obtido na simulação numérica e dos cálculos analíticos.

3 – Experimento inicial – preparação para determinação dos valores experimentais

O experimento inicial trata uma estrutura, muito comum dentro da engenharia, que pode abrigar pessoas, escritórios, depósitos, maquinários leves ou pesados, que é uma representação de um prédio de três pavimentos. A introdução dos novos equipamentos, disponíveis no laboratório, permitem excitar a estrutura, de duas formas diferentes. A primeira com excitador eletrodinâmico , *shaker*, e a segunda com martelo de impacto. Inicialmente, será tratado com o excitador eletrodinâmico e posteriormente com martelo de impacto.

A partir disso, elabora-se uma folha de relatório para que se possa aplicar uma metodologia na obtenção de dados, dos experimentos a serem realizados pelos alunos.

A descrição abaixo mostra como será a folha de laboratório e os passos que deverão ser seguidos pelos alunos.

Justificativa de cada item da folha de experiência.

Opta-se pelo nome convencional de:

1ª Experiência em análise modal.

Objetivo do experimento: Visa localizar o aluno dentro do contexto da disciplina e indicar o que se espera em termos de resultado.

Introdução: Visa remeter o aluno dentro do tópico estudado, dando uma pequena visão da teoria, que já foi ministrada.

Material utilizado: Visa informar, de forma ordenada, quais equipamentos serão utilizados em todo o processo de análise modal.

Procedimento: Visa indicar o aluno quais passos devem ser tomados para a realização da experiência. Cada parte do procedimento atende aos seguintes objetivos:

1ª parte e 6ª parte.

O aluno vai aprender a manusear o material, retirando das respectivas caixas, com cuidado, ajustando e recolocando em seus devidos lugares, limpos e íntegros.

2ª parte.

O aluno vai utilizar os conceitos teóricos, vistos nas aulas de controle, eletrônica e Mecânica vibratória I. O aluno vai vivenciar uma atividade profissional, dentro da Escola, ao realizar as interconexões dos diversos equipamentos e sensores.

3ª parte.

O aluno vai aplicar os conhecimentos adquiridos na disciplina Medida das das grandezas mecânicas, efetuando ajustes e, em determinadas, situações de calibração. Vai presenciar a problemática que existe quando se realizam conexões teóricas entre ligações físicas, na prática.

4ª parte.

O aluno vai vivenciar os processos e procedimentos antes de energizar todo o sistema, bem como ser o responsável pela integridade e segurança do experimento.

5ª parte.

O aluno irá aquisitar e tabular dados, na forma escrita e automática e também aluno vai interpretar e analisar os dados, podendo concluir e gerar um documento do seu experimento

3.1 Exemplo comentado para uma experiência introdutória em análise modal

O experimento foi proposto como se fosse uma experiência didática o qual servirá como base para outros experimentos. O exemplo está comentado e contém indicações do desenvolvimento do experimento e segue como indicado.

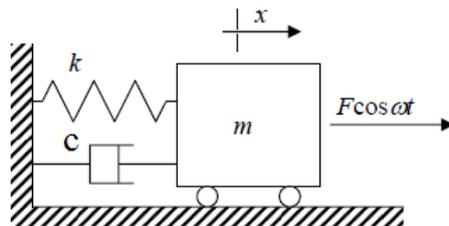
1ª Experiência em análise modal**MODOS DE VIBRAÇÃO****Objetivos do experimento:**

1. Identificar as frequências de ressonância de um modelo estruturado com três pavimentos.
2. comparar essas frequências e modos de vibração com as previsões teóricas
3. esboçar uma curva de resposta em frequência para um ponto na estrutura
4. investigar o efeito da adição de massa na estrutura

Introdução

Você sabe que uma única massa “m” ligada a uma mola de rigidez “k” tem uma frequência natural de vibração $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Se uma força alternada de $f(t) = F \cos \omega t$ é

aplicada à massa, a amplitude da vibração irá variar com a frequência ω da força aplicada, sendo maior quando $\omega = \omega_n$, desenho 7. A magnitude da resposta dependerá do valor do coeficiente de amortecimento proporcionada por c do amortecedor. No curso



Desenho 7. Representação de uma vibração forçada com um grau de liberdade.

de Mecânica Vibratória II você analisou o movimento de sistemas com mais de um grau de liberdade. Você lembra que um sistema com duas massas ligadas por molas tem duas frequências naturais, e um sistema com três massas tem três frequências naturais. Para cada frequência natural, as amplitudes relativas dos deslocamentos das massas são determinadas pelas equações que governam o sistema. Estas amplitudes definem os modos de vibrar. Neste experimento, você vai examinar os modos de um edifício modelado com três pavimentos.

A fotografia 2 mostra a estrutura, que possui três pavimentos e está apoiada em solo flexível tipo Winkler³. O modelo da estrutura está apoiado sobre a mesa.

É importante entender o comportamento de vibração de edifícios, tendo em vista que podem abrigar máquinas operatrizes, máquinas de transporte (ponte rolante), trânsito de veículos de carga (empilhadeiras), ou ainda se existe a possibilidade de atividade sísmica. Provocada pela natureza por movimentos externos, tal como trânsito de veículos pesados. A estrutura apresentada, tem três graus de liberdade. É uma representação simplificada de um prédio de três andares, em que se assume que toda a massa está concentrada nos andares e que toda a flexibilidade é fornecida pelas paredes. Este modelo de um edifício pode não ser totalmente realista, mas fornece uma boa aproximação do movimento estrutural, devido a uma excitação. A fotografia 2 mostra a estrutura, que possui três pavimentos e está apoiada em solo flexível tipo Winkler.

³O modelo de Winkler, assume fundação como um conjunto de molas lineares espaçadas uniformemente. Se uma tal base é submetida a um carregamento superficial, parcialmente distribuído, as molas não serão afetadas além da região do carregamento.



Fotografia 2. Modelo feito em acrílico e madeira, simulando um edifício de três pavimentos. O solo está simulado por molas.

O modelo da estrutura está apoiado sobre a mesa. Os aspectos estruturais foram vistos nas disciplinas de Teoria das estruturas, Resistência dos materiais e Mecânica Vibratória. O desenho 8 mostra um diagrama esquemático da estrutura. O deslocamento dos pisos são x_1 , x_2 , e x_3 como mostrado. A estrutura é excitada por uma força $f(t) = F \cos \omega t$ aplicada ao primeiro piso. Os pisos, cada um tem massa m e são separadas por paredes flexíveis, cuja rigidez é k . Esta rigidez pode ser estimada por meio de fórmulas conhecidas, indicadas no desenho 8.

Material utilizado:

Excitador eletrodinâmico *shaker*,

Gerador de sinais – modo senóide;

Amplificador de áudio;

Sistema de aquisição de sinais ADS2000;

Acelerômetros do tipo MEMs e ICP

Martelo de impacto

Transdutor de força

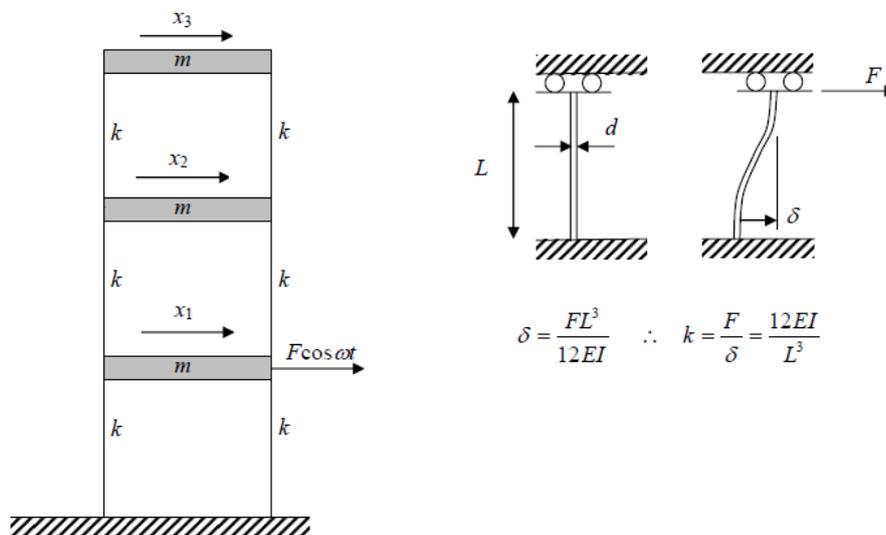
Condicionador de sinais

Calibrador para acelerômetros

Procedimento:

O experimento será realizado em seis partes:

- 1 – separação do material, montagem da estrutura, esboço de ligação dos equipamentos;
- 2 – ligação física dos equipamentos, conferências das ligações de acordo com o esboço;
- 3 – ajuste elétrico e mecânico dos equipamentos e sensores;
- 4 – início dos testes de condicionamento.
- 5 – início da coleta de dados.
- 6 – Desmontagem do experimento e acondicionamento do material.



Desenho 8. Uma opção para análise de vibração da estrutura. A excitação se dá no primeiro pavimento

Cálculo da rigidez de cada coluna.

Material → acrílico (**polimetil-metacrilato**), $\rho = 1190,0 \text{ kg/m}^3$

Módulo de Elasticidade em Tração $E = 3000,0 \text{ MPa}$

Largura _____ espessura _____ comprimento _____

Cálculo da massa de cada piso.

Largura _____ espessura _____ comprimento _____

$E =$ _____ $I =$ _____

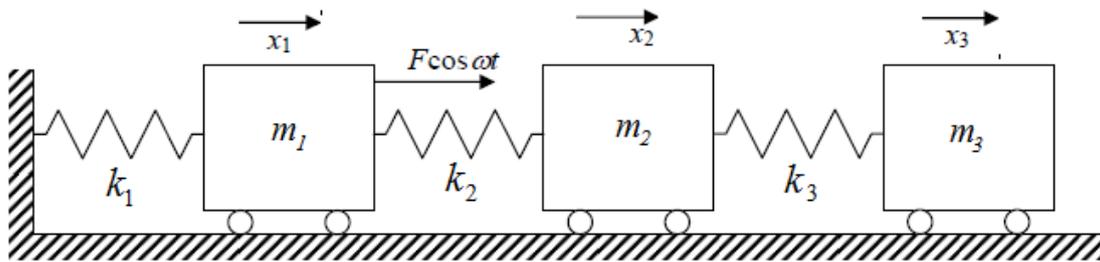
O programa em Matlab, descrito no quadro 1, pode calcular rapidamente os autovalores e autovetores teóricos.

Quadro 4. Programa genérico para cálculo das frequências e modos de vibração.

```

clear
M= valor de m *[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
k= valor de k *[k1 + k2 -k2 0; -k2 k2 + k3 -k3; 0 -k3 k3];
[U,D]=eig(k,M);
for mode=1:3
    U(:,mode)=U(:,mode)/U(1,mode);
    disp(sprintf('Mode %g has frequency %g Hz and mode shape [%g, %g, %g]',...
        mode, sqrt(D(mode,mode))/(2*pi),U(1,mode),U(2,mode),U(3,mode)))
end

```



Desenho 9. Modelo matemático da estrutura.

As equações que governam o movimento estão dispostas na equação 9.

Os valores das rigidezes e das massas são colocados em no formato da equação 10 e a resolução por meio do programa, mostrada no quadro 4.

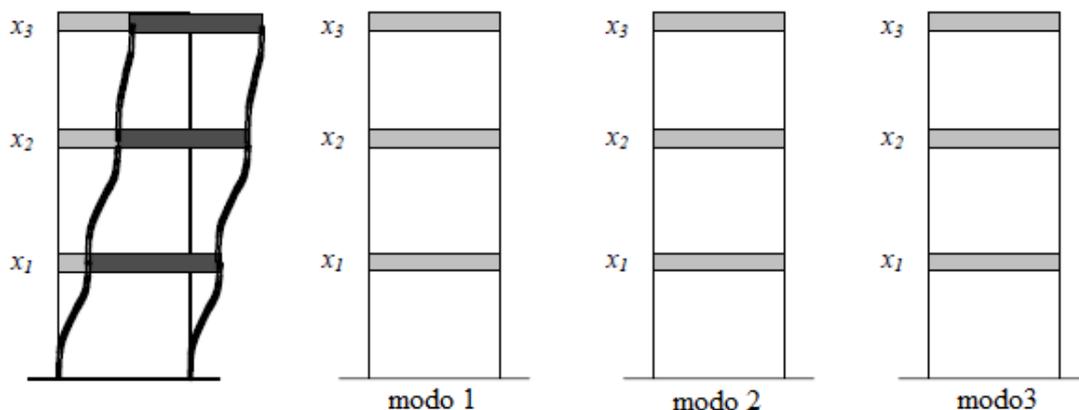
$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 9$$

A equação 4 e 5 desenvolvem o mesmo procedimento ($\det([m](-\omega^2) + [k]) = 0$).

$$\omega_1 = \frac{\text{rad}}{s}, \omega_2 = \frac{\text{rad}}{s} \text{ e } \omega_3 = \frac{\text{rad}}{s}$$

OBSERVAÇÃO: Utilizar os desenhos abaixo para esboçar a forma modal da estrutura e mostrar aquelas que se identificam com os modos, cuja estrutura foi modelada com o *software* SAP2000⁴. Os desenhos 11, 12 e 13, mostram como a estrutura se modifica, conforme a frequência de excitação.

⁴ O SAP2000 é um programa de análise estrutural tridimensional de estruturas lineares, não-lineares estáticas e dinâmicas.



Desenho 10. Aspectos da estrutura para confecção dos modos de vibrar.

A simulação da estrutura, para fins de comparação, estão mostradas abaixo nos desenhos 11, 12 e 13. Por meio deles é possível se verificar como é o comportamento em função da vibração livre.

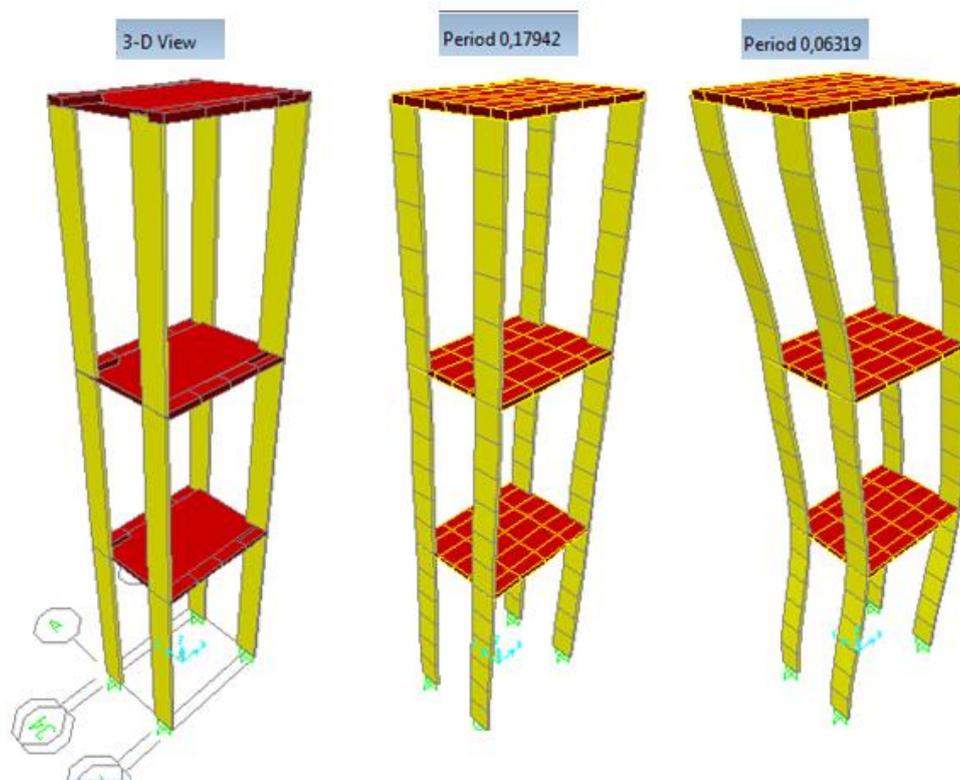
A fotografia 3, mostra a excitação na estrutura, por meio do martelo de impacto. O ponto de aplicação foi o mesmo, onde a estrutura foi excitada pelo *shaker*, 1º piso. O acelerômetro foi reposicionado a cada excitação. Os resultados são mostrados pelos gráficos 3 ao 8. Os gráficos 9 ao 11 indicam a função de transferência, entre a excitação e as acelerações, sabendo-se que a excitação foi realizada no primeiro piso e os acelerômetros colocados nos pisos 1 ao 3.

Excitação constante nas três situações, nos gráficos 3 ao 5, por volta de 2,0 N (escala calibrada x 10). O gráfico 3, mostra o comportamento da aceleração nas três direções. O gráfico 4, mostra a aceleração nas três direções no piso 2. O gráfico 5, mostra como aceleração é vista no piso 3. O gráfico 6, mostra o espectro cruzado dos sinais no primeiro piso⁵. O gráfico 7, mostra o espectro cruzado dos sinais no segundo piso e o gráfico 8, mostra o espectro cruzado dos sinais, relativo ao piso 3. O espectro foi realizado entre a força e os sinais de aceleração.

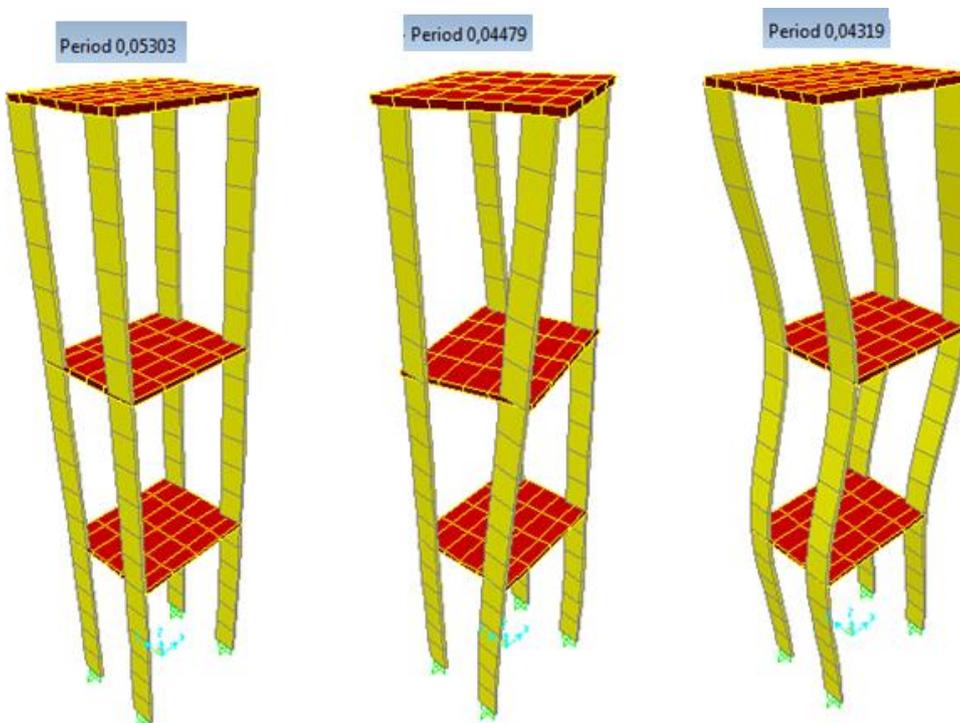
A função de transferência é um modelo matemático expresso por meio de uma equação diferencial que relaciona a saída com a entrada e independe da magnitude e da natureza da entrada.

O gráfico 9, indica a função de transferência da excitação no piso 1, com o acelerômetro no piso 1.

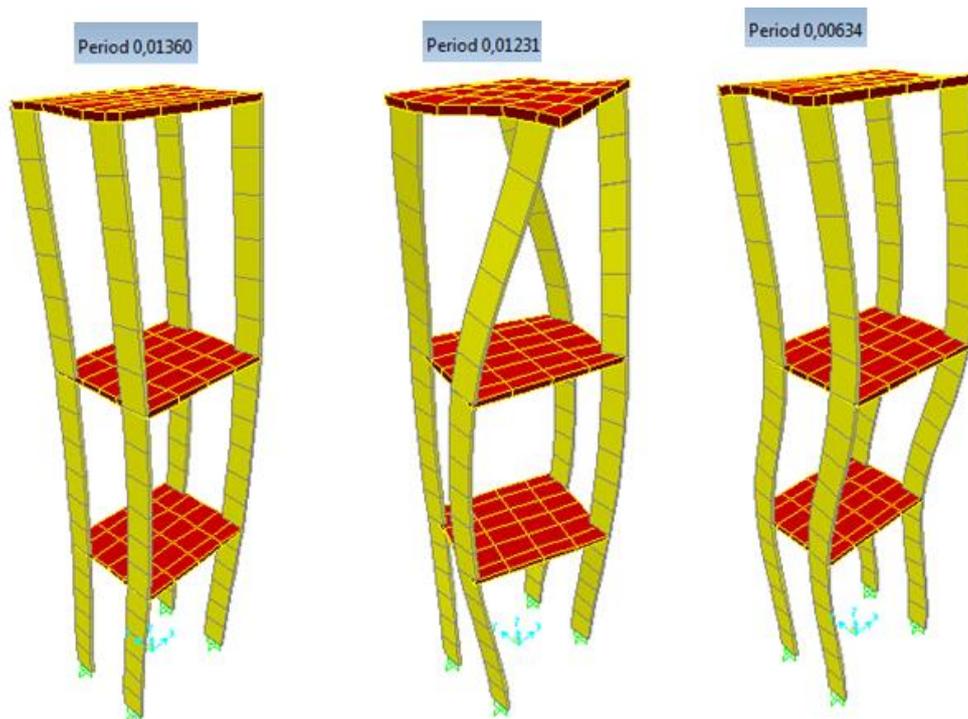
⁵ O espectro cruzado pode ser tratado como uma função de correlação, para examinar o relacionamento entre duas séries temporais no domínio do tempo.



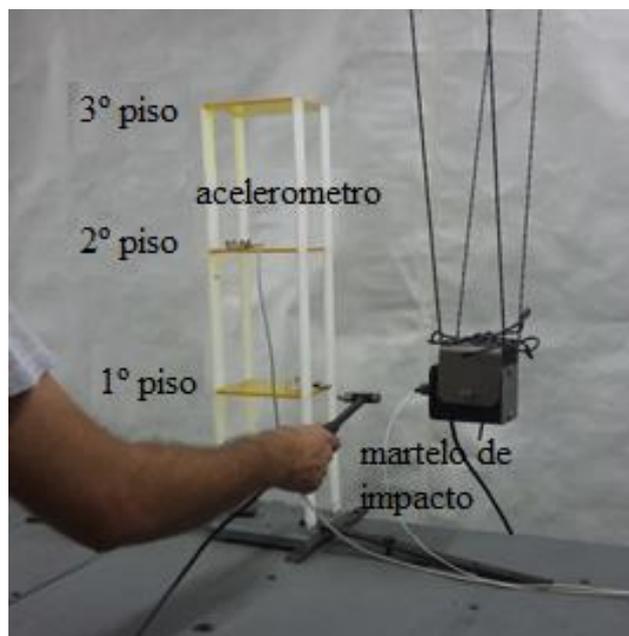
Desenho 11. Modos de vibrar simulados no *software* SAP 2000 para serem identificados com valores tirados do experimento. 0,0 Rad/s, 35,0 rad/s e 99,4 rad/s



Desenho 12. Modos de vibrar simulados no *software* SAP 2000 para serem identificados com valores tirados do experimento. 118,4 rad/s, 140,2 rad/s e 145,4 rad/s



Desenho 13. Modos de vibrar simulados no *software* SAP 2000 para serem identificados com valores tirados do experimento. 461,7 rad/s, 510,1 rad/s e 990,6 rad/s



Fotografia 3. Excitação da estrutura com o martelo de impacto, no mesmo local onde foi realizado a excitação com o *shaker* visto suportado por cabos.

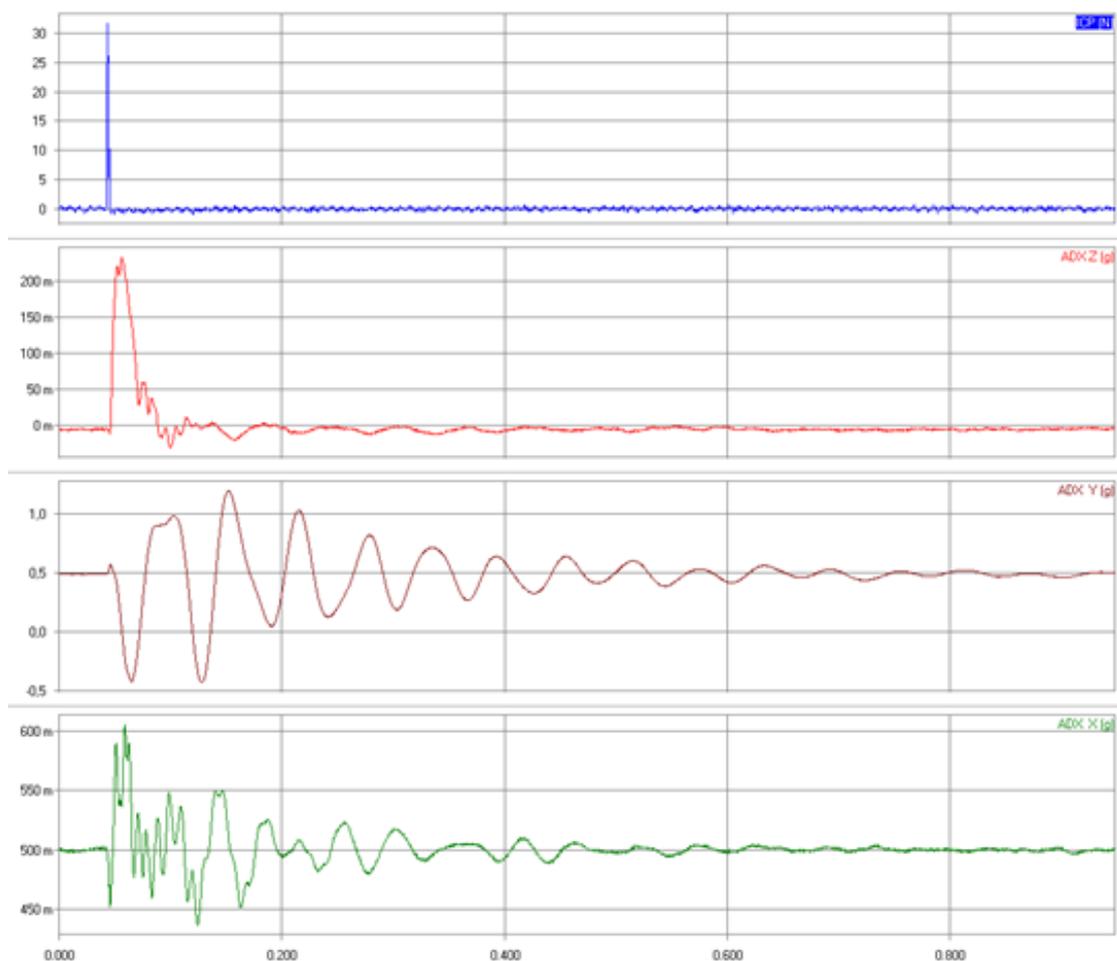


Gráfico 3. Excitação no piso 1, acelerômetro no piso 1.

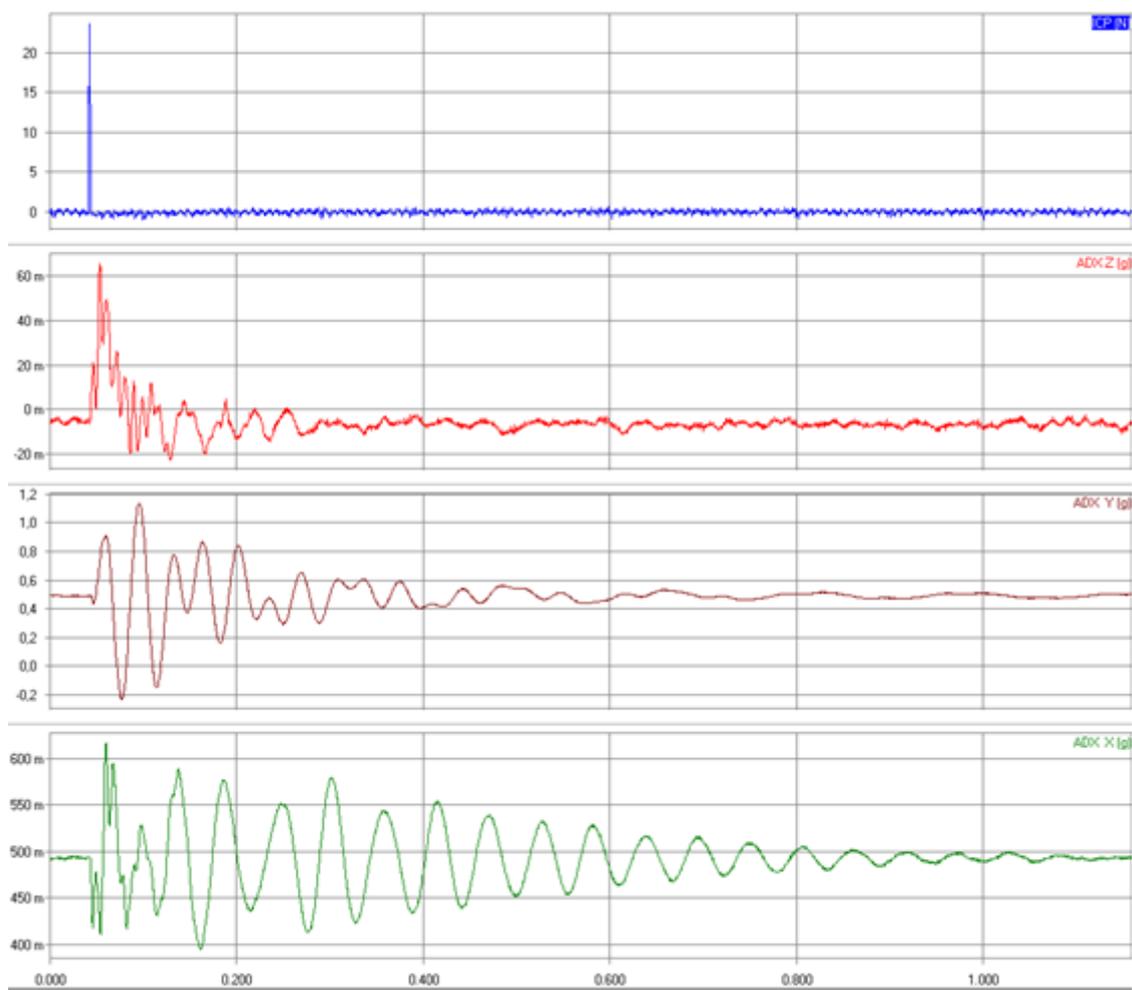


Gráfico 4. Excitação no piso 1, acelerômetro no piso 2

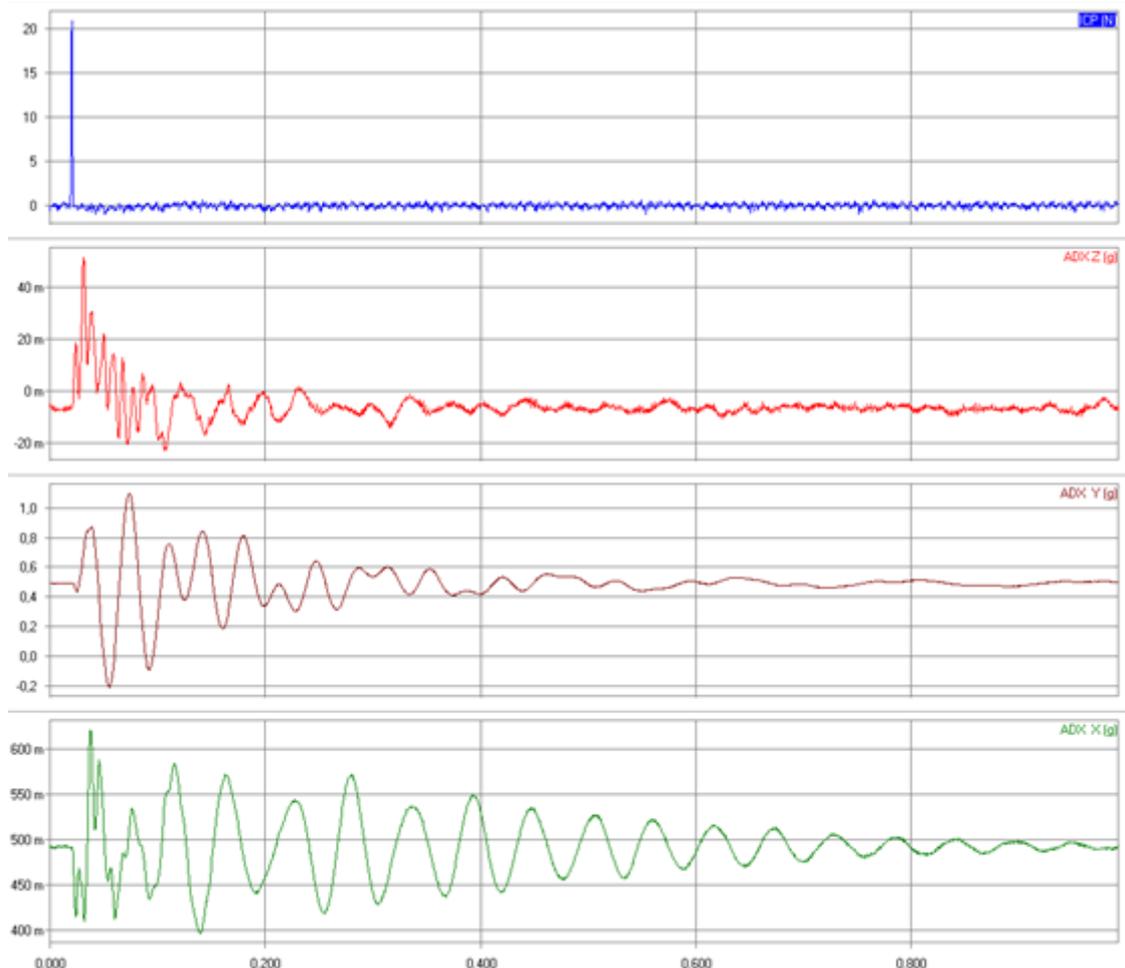


Gráfico 5. Excitação no piso 1, acelerômetro no piso 3



Gráfico 6. Espectro cruzado entre a excitação e os três sinais de aceleração, acelerômetro no piso 1.

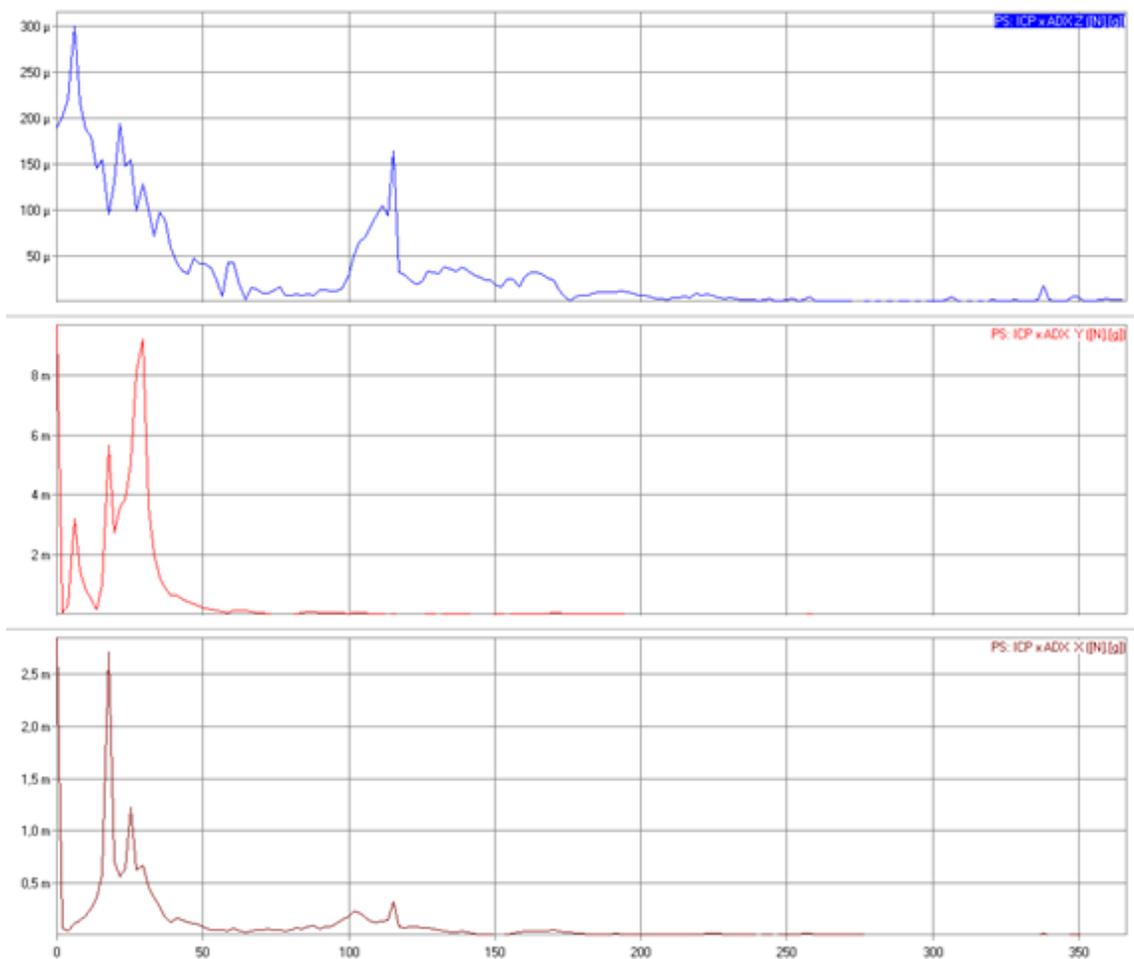


Gráfico 7. Espectro cruzado entre a excitação e os três sinais de aceleração, acelerômetro no piso 2.

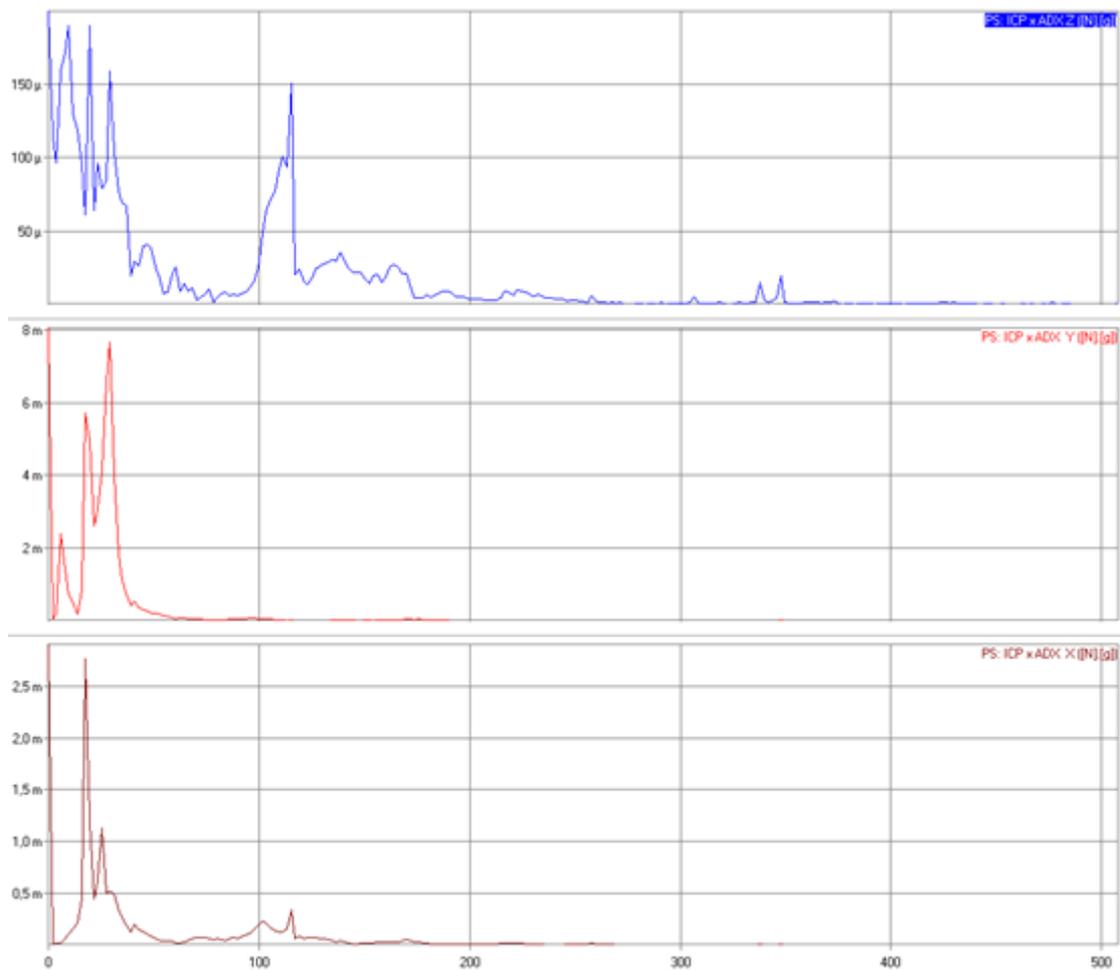


Gráfico 8. Espectro cruzado entre a excitação e os três sinais de aceleração, acelerômetro no piso 3.

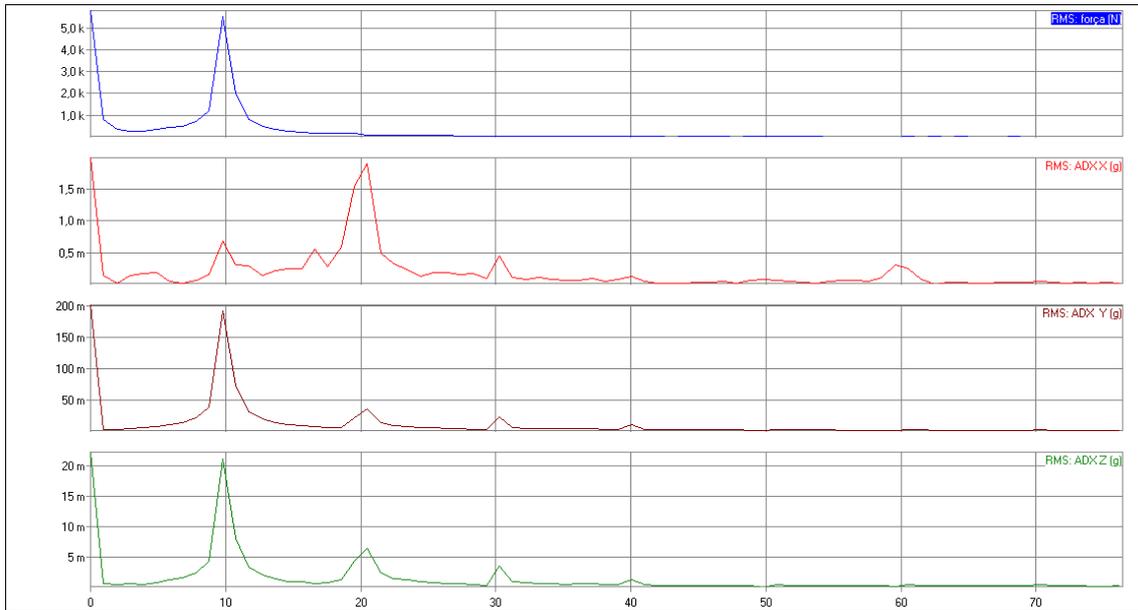


Gráfico 9. Função de transferência entre a excitação piso 1 e os sinais de aceleração piso 1.

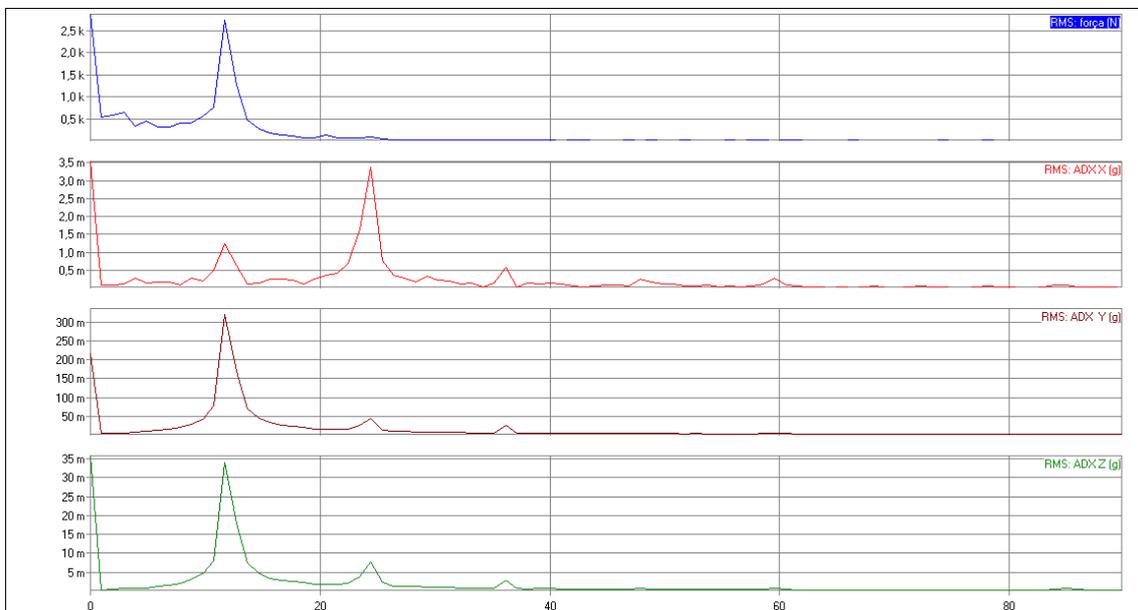


Gráfico 10. Função de transferência entre a excitação piso 1 e os sinais de aceleração piso 2.

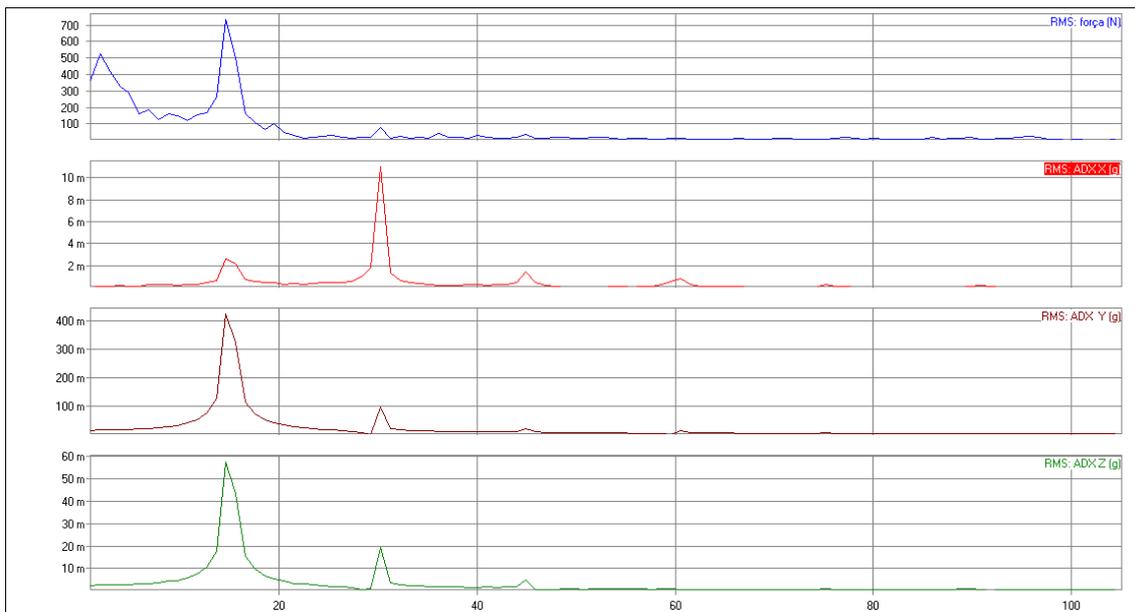


Gráfico 11. Função de transferência entre a excitação piso 1 e os sinais de aceleração piso 3.

4 - Elaboração da ementa para a disciplina Análise modal experimental

A ementa adaptada para colocação em um programa de graduação foi baseada em análises curriculares das universidades brasileiras. Os dados foram colhidos nos portais das universidades, que mantêm em áreas específicas de cada curso, o conteúdo programático das disciplinas. Devido ao grande número de universidades e cursos de engenharia mecânica, a escolha se baseou no *ranking* guia do estudante das dez universidades brasileiras mais procuradas. No entanto, outras universidades tradicionais do estado de São Paulo foram analisadas. Um critério de exclusão foi utilizado para que algumas escolas não fossem incluídas, são aquelas que não contemplaram a disciplinas sem vínculo com oscilações mecânicas, a razão disso é que, oscilações mecânicas, é requisito fundamental para o entendimento das técnicas da análise modal. Outros aspectos analisados, não excludentes, foram a carga horária dedicada ao estudo das oscilações mecânicas e aos tópicos abordados no conteúdo programático. Apesar de ser uma disciplina abordada em programas de pós-graduação, a análise modal experimental, devido ao uso constante e cotidiano, pode ser eleita com um conhecimento básico, a ser adicionado ao *curriculum* do engenheiro mecânico ou civil, recém formado. No entanto, para que isso seja possível, algumas disciplinas precisam ser agregadas aos conteúdos atuais. Tal qual Análise de sinais, Sistemas de aquisição de dados e Instrumentação. Dentro dos *curriculums* pesquisados, poucas escolas destinaram espaço para essas disciplinas dentro do seu projeto pedagógico. Porém, segundo o conselho nacional de educação – CNE, que compete ao engenheiro, determina segundo a resolução CNE/CES 11, de 11 de março de 2002, no Artigo 4º (MEC, 2002), que a formação do engenheiro tem por objetivo dotar o profissional dos conhecimentos requeridos para o exercício das seguintes competências e habilidades gerais:

- I. Aplicar conhecimentos matemáticos, científicos, tecnológicos e instrumentais à engenharia;
- II. Projetar e conduzir experimentos e interpretar resultados;
- III. Conceber, projetar e analisar sistemas, produtos e processos;
- IV. Planejar, supervisionar, elaborar e coordenar projetos e serviços de engenharia;
- V. Identificar, formular e resolver problemas de engenharia;
- VI. Desenvolver e/ou utilizar novas ferramentas e técnicas;
- VII. Supervisionar a operação e a manutenção de sistemas;

- VIII. Avaliar criticamente a operação e a manutenção de sistemas;
- IX. Comunicar-se eficientemente nas formas escrita, oral e gráfica;
- X. Atuar em equipes multidisciplinares;
- XI. Compreender e aplicar a ética e responsabilidades profissionais;
- XII. Avaliar o impacto das atividades da engenharia no contexto social e ambiental;
- XIII. Avaliar a viabilidade econômica de projetos de engenharia;
- XIV. Assumir a postura de permanente busca de atualização profissional.

Especificamente, para o engenheiro mecânico, as competências e habilidades inerentes à profissão, segundo a resolução do CONFEA/CREA nº. 1.010/2005, de 22 de agosto de 2005, considerou a necessidade do profissional egresso de engenharia mecânica ter capacidade para executar as atividades exigidas para o exercício profissional:

- Atividade 01 – Gestão, supervisão, coordenação e orientação técnica;
- Atividade 02 - Estudo, planejamento, projeto e especificação;
- Atividade 03 - Estudo de viabilidade técnico-econômica e ambiental;
- Atividade 04 - Assistência, assessoria e consultoria;
- Atividade 05 - Direção de obra e serviço técnico;
- Atividade 06 - Vistoria, perícia, avaliação, arbitramento, laudo e parecer técnico;
- Atividade 07 - Desempenho de cargo e função técnica;
- Atividade 08 - Ensino, pesquisa, análise, experimentação, ensaio e divulgação técnica; extensão;
- Atividade 09 - Elaboração de orçamento;
- Atividade 10 - Padronização, mensuração e controle de qualidade;
- Atividade 11 - Execução de obra e serviço técnico;
- Atividade 12 - Fiscalização de obra e serviço técnico;
- Atividade 13 - Produção técnica e especializada;
- Atividade 14 - Condução de trabalho técnico;
- Atividade 15 - Condução de equipe de instalação, montagem, operação, reparo ou manutenção;
- Atividade 16 - Execução de instalação, montagem e reparo;
- Atividade 17 - Operação e manutenção de equipamento e instalação;
- Atividade 18 - Execução de desenho técnico.

Entre as atividades e competências do engenheiro mecânico, pode se observar que, em alguns aspectos, existem coincidências, mas em nenhuma delas está especificada a função final. Isso é bom, pois significa que a construção de uma ementa pode estar calcada em conceitos e não em uma situação específica. Com relação aos pré-requisitos, se verificou que nenhuma escola aborda conceitos importantes para o entendimento da análise modal. No entanto, todas abordam alguns conceitos matemáticos necessários ao seu entendimento e, é certo que, tais conhecimentos ficam perdidos e não têm ligação com o conjunto de disciplinas apresentadas. Por outro lado, algumas disciplinas devem ser introduzidas para que se possa montar uma ementa sobre análise modal.

Uma disciplina importante para a análise modal experimental refere-se à análise de sinais que, apesar de abordada em alguns cursos de eletrônica, em momento algum e em nenhuma escola pesquisada apresenta em seus *curriculums* de mecânica. Outra disciplina que é muito importante relaciona-se com a instrumentação. Ou seja, operação e manipulação de equipamentos como: Osciloscópios, tacômetros, geradores de função e outros parecidos. Foi verificado que essa disciplina surge em algumas escolas nos cursos de mecânica, no entanto, não dão profundidade às medidas de aceleração ou velocidade. Por outro lado, o embasamento de cálculo, em várias escolas, supre o necessário, e em outras, vão além.

Disciplinas necessárias e fundamentais para servir como base nos pré-requisitos da Análise Modal Experimental.

- 1^a – Cálculo - Equações diferenciais ordinárias ;
- 2^a – Álgebra linear – Matrizes;
- 3^a – Instrumentação – equipamentos de medida para sinais elétricos;
- 4^a – Análise de sinais – medidas dedicadas aos sinais mecânicos.

Quadro 1. Escolas de engenharia mecânica versus disciplinas pré-requisitos para análise modal. (São Paulo e grande São Paulo)

Escola	Vibrações mecânicas	Cálculo diferencial III e IV	Álgebra linear	Instrumentação	Análise de sinais	Observação
Universidade de Brasília –Unb	s	s	s	n	s	Assis, 2015
Universidade Federal do Pará	s	s	s	n	n	Assis, 2015
Universidade Federal do Rio grande do Sul	s	s	s	n	n	Assis, 2015
Universidade federal de Santa Catarina	s	s	s	n	n	Assis, 2015
Universidade de Campinas	?	?	?	?	?	Assis, 2015
Universidade São Carlos	s	s	s	n	n	Assis, 2015
Instituto Tecnológico da Aeronáutica	s	s	s	n	s	Assis, 2015
Universidade de São Paulo	?	?	?	?	?	Assis, 2015
Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia	s	s	s	n	n	Fundação de Educacional Inaciana – FEI – 2015
Instituto de Tecnologia Maua	s	s	s	n	n	Instituto Mauá de Tecnologia - 2015
Universidade Paulista	?	?	?	?	?	Universidade Paulista – 2015
Inspere	?	?	?	?	?	Instituto de ensino e pesquisa - 2015
Faap	?	?	?	?	?	Fundação Armando Alvares Penteado - 2015
Anhembi-Morumbi	s	s	s	n	n	Universidade Anhembi-Morumbi - 2015
São Judas	s	s	s	n	s	Universidade São Judas - 2015
Uninove				n		Universidade Nove de Julho - 2015
Anhanguera				n		Universidade Anhanguera - 2015

A tabela 1 mostra, de forma simplificada, a disponibilidade de disciplinas em escolas de São Paulo, grande São Paulo, interior e algumas capitais e cidades do Brasil. Algumas escolas não disponibilizam o conteúdo programático de disciplinas e nem mencionam a carga horária (na tabela está indicado com o sinal ?). No entanto, disciplinas como instrumentação – equipamentos de medida para sinais elétricos e análise de sinais – medidas dedicadas aos sinais mecânicos não fazem parte do *curriculum* de várias escolas. Essas disciplinas são de fundamental importância para a análise modal experimental. Essa informação tem relevância no sentido em que a aplicação de uma carga horária dedicada ao assunto, teria consequências importantes no plano pedagógico do curso, criando um diferencial em relação às outras instituições e, o mais importante, qualificando o estudante, antes mesmo dos cursos de pós graduação. No entanto, essa realidade não é partilhada em instituições dos Estados Unidos da America e da Europa. Na tabela, foi computada a existência, ou não, da disciplina análise modal, bem como vibrações mecânicas.

Quadro 2. Universidades fora do país que contemplam a disciplina sobre análise modal.

Escola	Vibrações mecânicas	Análise modal	Observação
Massachusetts Institute of Technology - MIT	s	s	<i>QS World University Rankings, 2015</i>
California Institute of Technology - Caltech	s	s	QS World University Rankings, 2015
Stanford University	s	n	QS World University Rankings, 2015
Imperial College London	s	s	QS World University Rankings, 2015
National University of Singapore	s	n	QS World University Rankings, 2015
Universidade nacional autonoma do mexico	s	n	QS World University Rankings, 2015

Os programas de pós-graduação em engenharia mecânica, como deveriam, possuem em suas ementas as disciplinas sobre processamento de sinais, instrumentação e análise modal. Isso não caracteriza que seja exclusividade da pós-graduação, mas apenas uma característica. Cita-se, por exemplo, a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP, 2011), que dentro do ementário contempla duas disciplinas voltadas á análise modal:

1ª Análise Modal de Estruturas

Ementa: Formulação modal. Sistemas com amortecimento estrutural e viscoso. Funções de resposta em frequência (FRF). Introdução à análise de sinais em tempo discreto. Transformada de Fourier discreta. Densidade espectral. Estimadores da FRF. Métodos de estimação de parâmetros nos domínios do tempo e da frequência. Comparação de resultados da análise modal teórica e experimental. MAC. Introdução ao ajuste de modelos.

2ª Dinâmica de Estruturas.

Ementa: Equilíbrio dinâmico e princípio de Hamilton. Obtenção de equações de equilíbrio dinâmico para meios contínuos simples: barras, eixo e vigas. Análise modal e resposta por superposição modal. Métodos aproximados usando equações de Lagrange. Análise modal de sistemas discretos. Resposta livre forçada. Integração direta a resposta por transformadas de Fourier e Laplace. Introdução ao método dos elementos finitos em dinâmica estrutural. Introdução ao método de redução e subestruturação. Introdução à análise modal experimental.

Essas ementas não são exclusividade da UNICAMP, e nada diferem de outros programas de pós-graduação. Observando-se os conteúdos, ou outros, nada indicam que não poderiam ser cumpridos em um curso comum de graduação. Os conceitos físicos, matemáticos e mecânicos não são novidade ao aluno e eles são amplamente explorados em várias disciplinas durante o curso de graduação.

4.1 – Apresentação da ementa ao núcleo estruturante

O fluxograma 1, mostra a interligação interdisciplinar e uma sequência simples para implantação da disciplina Análise modal experimental, no *curriculum* da graduação. Os grifos amarelos, indicam os locais das novas disciplinas. A proposta da inclusão da disciplina foi mencionada em reunião ordinária, onde foi descrita em termos gerais, bem como sua importância como metodologia aplicada na área da mecânica, aeronáutica, estrutural e manutenção.

Quadro 3. Apresentação sistemática e apresentação do conteúdo programático para a disciplina, Análise modal experimental.

Curso: Engenharia Mecânica		Núcleo Temático: NDE Máquinas e Processos de Fabricação	
Disciplina: Introdução à análise modal experimental			Código da Disciplina:
Professor(es):		DRT:	Etapa: 9^a
Carga horária: 2 h/a	() Teórica (x) Prática		Semestre Letivo:
<p>Ementa:</p> <p>Formulação modal. Funções de resposta em frequência (FRF). Introdução à análise de sinais em tempo discreto. Transformada de Fourier discreta. Densidade espectral. Estimadores da FRF. Métodos de estimação de parâmetros nos domínios do tempo e da frequência. Comparação de resultados da análise modal teórica e experimental. Estabelecimento da relação entre as soluções qualitativas e quantitativas dos processos. Avaliação dos impactos das atividades no contexto social, corporativo e ambiental.</p>			
Objetivos:			
Conceitos	Procedimentos e Habilidades	Atitudes e Valores	
<ul style="list-style-type: none"> - Identificar a metodologia a ser aplicada; - Definir os equipamentos e sistemas utilizados na análise; - Descrever os estágios de trabalho; - Indicar o modelo mais adequado para a análise numérica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicar as Leis do movimento; - Analisar e aplicar as práticas da dinâmica de máquinas; - Relacionar resultados em função dos equipamentos utilizados; - Interpretar resultados; - Resolver ocorrências durante a aquisição de sinais; - Avaliar criticamente os fenômenos e processos relacionados à dinâmica de máquinas e sistemas; - Construir um método de análise para os problemas; - Avaliar os impactos das suas atividades no contexto social e ambiental; - Extrapolar os exemplos de classe para situações reais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Assumir postura responsável e ética perante os problemas; - Buscar atualização profissional na área; - Reconhecer o papel dos estudos de análise modal como parte da qualidade e economia de energia. 	

Conteúdo Programático:

1. Formulação modal.
2. Sistemas com amortecimento estrutural e viscoso.
3. Funções de resposta em frequência (FRF).
4. Introdução à análise de sinais em tempo discreto.
5. Transformada de Fourier discreta.
6. Densidade espectral.
7. Comparação de resultados da análise modal teórica e experimental.

Metodologia:

A disciplina exige estudo e resolução de problemas em sala de aula e fora dela. Para isto, são propostos exercícios e atividades práticas ao final de cada item. As aulas teóricas se baseiam na abordagem expositiva, partindo dos conceitos relacionados na dinâmica de máquinas e sistemas, visando à solução de problemas práticos. As aulas de exercícios proporcionam interação entre os alunos, para aplicação da teoria nos exercícios práticos.

Critério de Avaliação:

O processo de avaliação deverá incluir no mínimo dois instrumentos de avaliação intermediária, conforme o Regulamento Acadêmico. O aluno poderá efetuar uma Prova Substitutiva com o intuito de substituir a menor nota que compõe a Média das Avaliações Intermediárias.

MI (média das avaliações intermediárias)

PAF (avaliação final)

MF (média final)

Primeira possibilidade:

$MI \geq 7,5$ (sete e meio) e frequência $\leq 75\%$ aluno aprovado na disciplina.

MF = MI

Segunda possibilidade:

$2,0 < MI < 7,5$ e frequência $\geq 75\% \Rightarrow$ obrigatoriedade da realização da PAF.

MF = (MI + PAF) / 2

Bibliografia Básica:

1 - Sinha, J, K. Vibration Analysis, Instruments, and Signal Processing, CRC Press Taylor & Francis, New York, 2015.

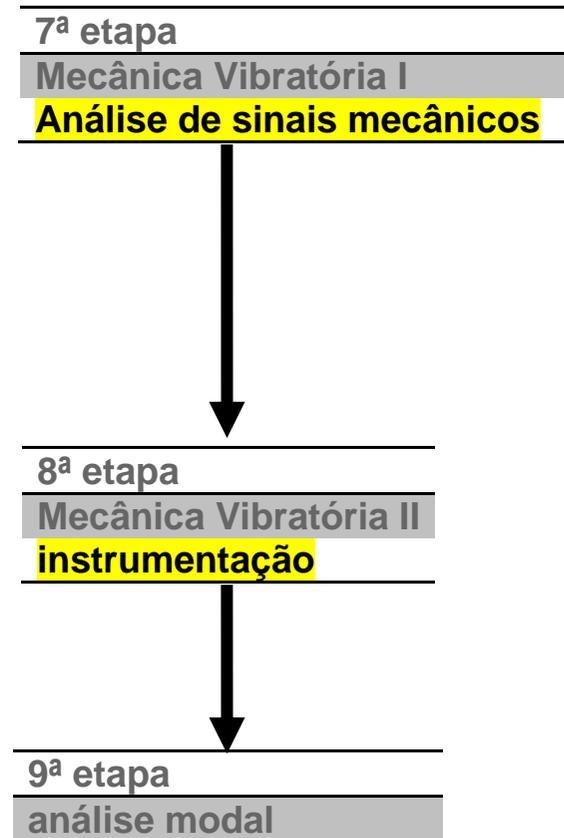
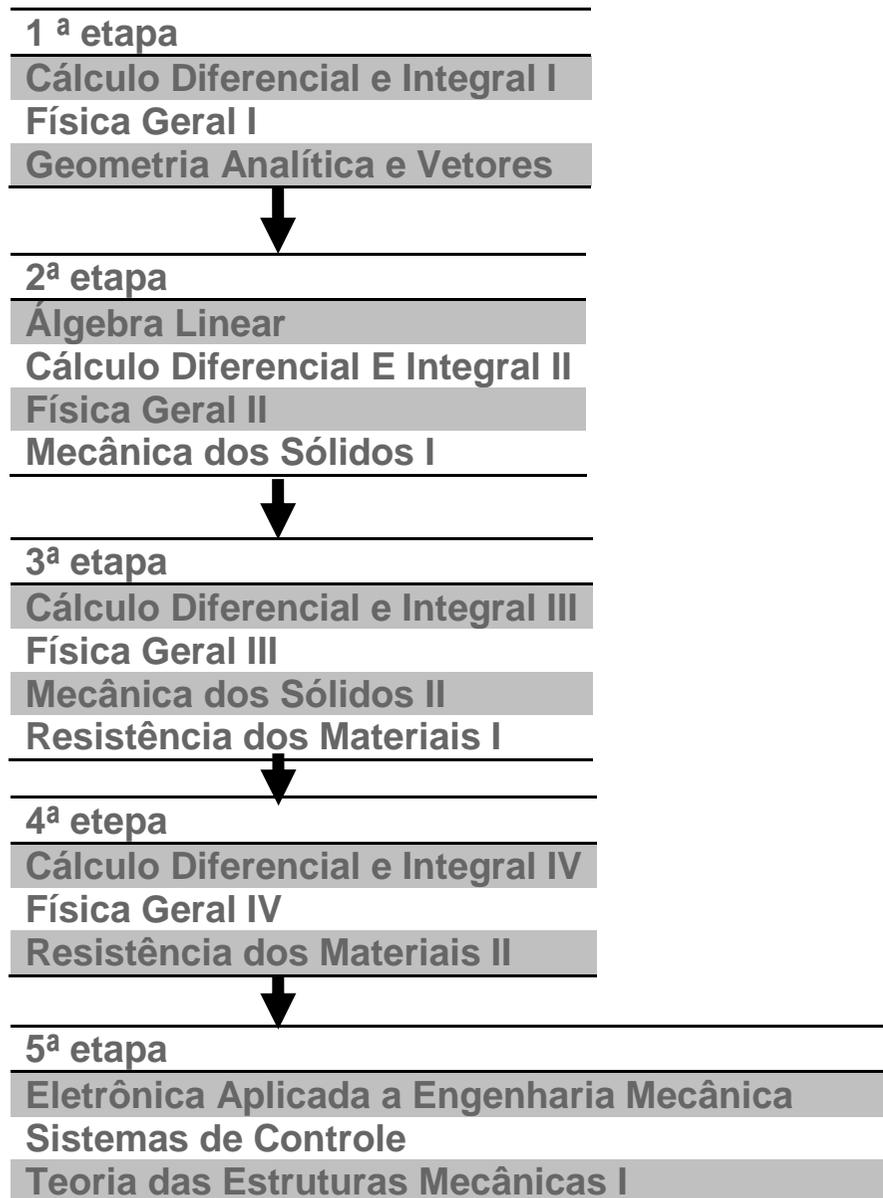
2 – Silva, C, W. Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation CRC Press, 2007

3 – Rainieri, C. Fabbrocino, G. Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures An Introduction and Guide for Applications. Springer, New York, 2014.

Bibliografia Complementar:

1. Rao, S, S. - Mecânica vibratória, São Paulo: Ed. Pearson, 2009.
2. Balakumar, B; Edward. B, M. Vibrações mecânicas, São Paulo: Ed. Cengage Learning, 2011.
3. Iman, D. – Engineering vibrations 2nd. Ed. Prentice Hall. 1995
4. Steidel, R, E. - An Introduction To Mechanical Vibration, Ed. John Willey Sons, 1998
5. Craig, Roy. - Structural Dynamics, Ed. John Willey Sons, 1996
6. Thomas, T, W. - Theory Of Vibration With Application, Ed. Prentice Hall, 1998

7. Hutton, V.D. – Applied Mechanical Vibrations, Ed. McGraw-Hill, 1981
8. Seto, W. - Vibrações Mecânicas, Ed McGraw Hill, São Paulo, 1980
9. Kelley, S.G. - Mechanical Vibrations, Ed. McGraw Hill, New York, 1997
10. Hartog, D, P, J. Mechanical Vibrations, Ed. Dover, reimpressão, 1985



Fluxograma 1. Dependência de requisitos para atingir o estágio da análise modal

5 - Análise da adaptabilidade do laboratório para atender a proposta

O laboratório de vibrações mecânicas da Escola de Engenharia, com as novas aquisições é capaz de atender aos experimentos que, porventura serão indicados para auxílio da teoria. Com eles é possível realizar experiências e fazer demonstrações e servem para os trabalhos de conclusão de curso (TCC) e iniciação científica das categorias PIBIC, PIVIC, PIBIT e PIBEX, além de servir à graduação. A introdução da mesa inercial, produz um ganho com relação às demonstrações, em mecânica vibratória, para sistemas com um grau de liberdade e, ainda, com capacidade de atender projetos que exijam a neutralidade das influências da fundação (solo), ou vice versa. Experimentalmente, foi evidenciada a correspondência teórico – prática, bem como a utilização dos equipamentos mais antigos do laboratório.

O modelo de acrílico, representativo de um prédio de pavimentos, apresentou resultados bastante significativos com relação à modelagem numérica. Tendo em vista a obtenção dos gráficos temporais e em função da frequência. A excitação com o martelo de impacto proporcionou resultados bastante coerentes, com relação a excitação do *shaker*.

A determinação da frequência de ressonância da massa inercial e a validação numérica e analítica, atestam o conjunto como significativo e capaz.

O aspecto modal da estrutura de acrílico não pode ser determinada diretamente, pois demandaria uma quantidade maior de sensores. A técnica utilizada, SISO (*single in – single out*), foi utilizada para a determinação das frequências modais. No entanto, as formas modais da estrutura não puderam ser determinadas. O sistema de aquisição de dados, bem como os *softwares* de aquisição e análise desempenharam adequadamente suas funções. A proposta do experimento, descrito no item 3.1, foi realizada conforme os passos descritos e se mostrou exequível durante o período de aula. Os dados aquisitados foram convertidos e mostrados pelos gráficos 3 ao 11. Deles, foi possível verificar extrair dados das frequências modais e também a equivalência entre a modelagem numérica e experimental.

6 – conclusão

A proposta de uma disciplina específica sobre análise modal é possível dentro do curso de graduação, pois com o conhecimento adquirido durante o curso e com algumas mudanças na grade horária pode-se acrescentar um conhecimento a mais ao graduando que, por sua vez, terá a oportunidade de apresentar ao mercado um diferencial só, presente naqueles com conhecimentos de um curso de pós graduação. Apresenta-se na seção 4, do presente trabalho, um processo para a modificação da grade curricular, do curso de engenharia mecânica, no sentido de introduzir tal conhecimento relativo à Análise Modal Experimental. Tal processo acadêmico exige o envolvimento do núcleo estruturante conforme Mackenzie (2011), onde se vê que no item X propõe: **Indicar formas de incentivo ao desenvolvimento de linhas de pesquisa e extensão, oriundas de necessidades de graduação, de exigências do mercado de trabalho e afinadas com as políticas públicas relativas a área de conhecimento do curso.** A consulta prévia aos integrantes do núcleo, que em questão é o de construção de máquinas, obteve uma aprovação, a qual só poderá ser oficializada quando da reunião semestral. Além desse procedimento, outra estância é a apresentação da proposta ao colegiado de curso, que por sua vez fará o encaminhamento ao conselho de ensino e pesquisa e, finalmente para o conselho universitário. Como justificativa para que a proposta seja apreciada e aprovada é a existência de espaço na grade curricular e que possuímos, por conta do presente trabalho, um laboratório que pode atender as exigências acadêmicas. Outro argumento, é que a Escola de Engenharia, seria pioneira em abordar um tópico, até então somente visto nos cursos de pós graduação. E finalmente, essa disciplina iria contribuir para que nossos egressos tivessem um destaque diferencial, oferecendo ao mercado um profissional capaz de, imediatamente atuar na área de análise vibracional, tão exigida nos ramos da aeronáutica, manutenção e projetos estruturais. Por certo, esse exemplo seria seguido por outras escolas, que vêm no Mackenzie o seu *Benchmarking*⁶. Tal afirmação está corroborada pelo o estudo, com algumas escolas de engenharia mecânica, conforme o quadro 1, o qual indica que os currículos dessas escolas não possuem uma disciplina sobre análise modal. Isso é relevante pois, caso venha a se concretizar a introdução dessa disciplina em nosso currículo, estaríamos com um diferencial acadêmico muito forte perante às outras escolas e estaríamos nos igualando a

⁶ Termo corporativo que consiste no processo de busca das melhores práticas numa determinada indústria e que conduzem ao desempenho melhor.

outras escolas de grande prestígio internacional, fato que pode ser visto no quadro 2. A introdução da disciplina Análise modal experimental, iria afetar a carga horária em seis horas aula, para mais. Conforme o fluxograma 1, as alterações iriam começar no sétimo semestre, com a introdução da disciplina, Análise de sinais mecânicos, cujo conteúdo, se espelha em aquisição de dados, Introdução ao processamento de sinais, amostragem, filtros digitais, janelamento e espectro de frequência, sensores e equipamentos de aquisição automática de dados. Esse conteúdo, servirá como base e complementação para a disciplina de instrumentação, que seria ministrada no oitavo semestre e que viria abordar características estáticas e dinâmicas dos instrumentos e sensores, aceleração, força, torque, potência mecânica. A base teórica, dentro desse processo, estará sendo abordada pelas disciplinas Mecânica vibratória I e Mecânica vibratória II, cujos conteúdos estarão alinhados com o proposto pela disciplina, análise modal, descrita em um plano de ensino apresentado no quadro 3, onde se observa a preocupação com o conteúdo relativo à função de Fourier, bem como o algoritmo FFT (fast transformer Fourier). A dependência, em termos de conteúdo, e seguindo um elenco de disciplinas que são necessárias como co-requisitos e pré-requisitos, o Fluxograma 1 aborda sequencialmente as disciplinas que sustentam o conteúdo de análise modal. Destacam-se aquelas ligadas à eletrônica e controle, pois irão fornecer os conceitos necessários sobre leitura, interpretação e manipulação de equipamentos eletrônicos, situações que o engenheiro mecânico não está acostumado e não tem intimidade.

Sob o aspecto técnico, a reformulação e a adaptação dos equipamentos de laboratório deram resultados excelentes e têm plena capacidade de acompanhar a teoria, ilustrando e propondo práticas e experimentos na área de dinâmica estrutural. O elemento faltante, o martelo de impacto, se adaptou facilmente ao equipamento de aquisição de dados existente, ADS200. O conjunto se completou com o excitador dinâmico (*shaker*), o sensor de força, o amplificador de potência e o gerador de sinais. Esse conjunto foi capaz de levantar a ressonância da mesa inercial e determinar as frequências de ressonância do modelo de um prédio de três andares, fotografia 2. A confrontação foi realizada com a modelagem no *software* SAP2000[®], que gerou os modos de vibrar e as frequências de ressonância do prédio. Tais resultados, foram importantes para a confecção da primeira experiência em análise modal, como proposto pelo item 3.1, onde descreve-se o procedimento de obtenção das frequências de ressonância. A ficha de laboratório, segue o proposto para feitura da experiência em seis passos além de abordar um conteúdo teórico, propondo um método analítico, visto no

desenho 8, que acompanha a modelagem matemática onde os resultados puderam ser determinados, por meio de uma programação numérica, realizada pelo *software* MatLab[®] vista no quadro 4.

Em termos de hora aula, a preparação do experimento, bem como a obtenção dos dados e a análise dos dados, iriam absorver três aulas das dezoito propostas no semestre.

7 - Bibliografia

- ASSIS, T. **Cinco estrelas: as melhores faculdades de Engenharia Mecânica**, Guia do Estudante, 2015. Disponível em: <http://guiadoestudante.abril.com.br/blogs/melhores-faculdades/tag/engenharia-mecanica/>. Acesso em 20/03/2015.
- BORGES, A, S. **Análise modal baseada apenas na resposta - decomposição no domínio da frequência**, 2006, 105f. Dissertação de mestrado (engenharia Mecânica) UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2006.
- CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E AGRONOMIA – CONFEA, **Resolução nº 1.010, de 22 de agosto 2005**. Dispõe sobre a regulamentação da atribuição, Disponível em: <http://www.abepro.org.br/arquivos/websites/1/1010-05.pdf>, acesso em 25/06/2014.
- EWINS, D, J. **Modal Testing: Theory and Practice**, Research Studies Press; Revised edition, Reino Unido, 1984
- FUNDAÇÃO EDUCACIONAL INACIANA (FEI), **ementas**. Disponível em http://portal.fei.edu.br/pt-BR/ensino/graduacao/eng_mecanica/Paginas/engenharia_mecanica.aspx. acesso em 20/03/2015.
- GASPARETTO, V. PINHEIRO, H. **Análise modal da pá de uma turbina eólica**, in: XXI Congresso de iniciação científica e tecnologia e VI feira de protótipos, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do sul, Ijuí, Rio Grande do Sul, 2006.
- GERGES, Y, N, S. **Estado da Arte para Solução dos Problemas Vibroacústica por Métodos Numéricos**. palestra, ref. 43.40, Acústica 2000, Madrid. 2000.
- HEIRICH, A. SIMÃO, B. CASSOL, F. **Desenvolvimento e análise de uma bancada didática para ensaios de vibrações**. 3ª SIEF – Semana Internacional das Engenharias da FAHOR 7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade Horizontina, Rio Grande do Sul, 2013.
- INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA (Maua), **ementas**. Disponível em <http://www.maua.br/cursos-graduacao/engenharia-mecanica/disciplinas-diurno>. Acesso em 20/03/2015.
- INSTITUTO DE ENSINO E PESQUISA (Insper), **ementas**. Disponível em <http://www.insper.edu.br/vestibular/engenharia/mecanica/>. Acesso em 20/03/2015.
- LIEVEN, N, A, J. EWINS, D, J. **The context of experimental modal analysis**, Phil. Trans. R. Soc. Lond . A, 359, p.3,200.
- LIMA, M, N, A. **Testes modais utilizando martelo instrumentado em estruturas de baixas frequências**, 2006, 55f, Tese de Doutorado (engenharia Mecânica), Universidade federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.
- MACKENZIE, **Universidade Presbiteriana Mackenzie, Reitoria, ATO Nº 03, de 23 de março de 2010. Cria e implanta o Núcleo Docente Estruturante (NDE), de natureza didático-pedagógica.**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA – MEC - **conselho nacional de educação câmara de educação superior, resolução cne/ces 11, de 11 de março de 2002**, Institui Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. 2002. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES112002.pdf>. acesso em 25/06/2014

QS WORLD UNIVERSITY RANKING. TOP UNIVERSITIES. Disponível em <http://www.topuniversities.com/subject-rankings/2015>. Acesso em 9/03/2015

RAIA ,F. PEKELMAN, H. PAPPALARDO, A, J. **Metodologias para o estudo de vibrações mecânicas: de holzer aos elementos finitos, in: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Blumenau, Santa Catarina, 2011.**

UNIVERSIDADE PAULISTA (UNIP), **ementas**. Disponível em http://www3.unip.br/ensino/graduacao/tradicionais/exatas_eng_mecanica.aspx#objetivos. Acesso em 20/03/2015

UNIVERSIDADE ANENBI-MORUMBI, **ementas**. Disponível em <http://portal.anhembi.br/estude-aqui/graduacao/cursos/engenharia-mecanica-energias-renovaveis-e-tecnologia-nao-poluente/>. Acesso em 20/03/2015.

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS, **ementas**. Disponível em http://www.usjt.br/cursos/graduacao/curriculos_cursos/2015/eng_mecanica.pdf. Acesso em 20/03/2015

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO (Uninove), **ementas**. Disponível em <http://www.uninove.br/Paginas/ShowGraduacao.aspx?SEQ=408>. Acesso em 20/03/2015.

UNIVERSIDADE ANHANGUERA , **ementas**. Disponível em http://www.anhanguera.com/graduacao/cursos/engenharia_mecanica.php. Acesso em 20/03/2015

UETA, V, M, N. **Análise de um sistema de vibração com três graus de liberdade: comparação entre três métodos de solução**, 2015, 48f. Trabalho de conclusão de curso,(Bacharel em engenharia naval), Escola Politécnica, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015

UNICAMP, **ementas**. Disponível em <http://www.dac.unicamp.br/sistemas/catalogos/grad/catalogo2011/ementas/todasmc.html>. Acesso em 10/03/2015

VASCONCELOS, A, M. **Análise modal de um painel de carbono/epoxi sujeito a cargas de cisalhamento, in:** Brazilian Symposium on Aerospace Eng. & Applications, 3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control, September 14-16, 2009, S. J. Campos, SP, Brazil, 2009.