



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

NILSON RAFAEL PEREIRA DA SILVA

**Análise Modal em Fundação de um Sistema
Mecânico Rotativo presente no Setor de
Extrusão de uma Fábrica de Ração**

SÃO LUÍS - MA
2019

NILSON RAFAEL PEREIRA DA SILVA

Análise Modal em Fundação de um Sistema Mecânico Rotativo presente no Setor de Extrusão de uma Fábrica de Ração

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Flávio Nunes Pereira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO (A) ALUNO (A) NILSON RAFAEL PEREIRA DA SILVA, E ORIENTADO PELO (A) PROF (A). FLÁVIO NUNES PEREIRA.

ASSINATURA DO (A) ORIENTADOR (A)

SÃO LUÍS - MA
2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL – UEMA

Silva, Nilson Rafael Pereira da.

Análise modal em fundação de um sistema mecânico rotativo presente no setor de extrusão de uma fábrica de ração – São Luís, 2019.

64p.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Msc. Flávio Nunes Pereira.

1. Análise de vibração. 2. Análise modal. 3. Frequências naturais. 4. Ressonância. 5. Método dos Elementos Finitos. I. Título.

CDU: 621.03

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Análise Modal em Fundação de um Sistema
Mecânico Rotativo presente no Setor de
Extrusão de uma Fábrica de Ração**

Autor: Nilson Rafael Pereira da Silva

Orientador: Flávio Nunes Pereira

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:

Prof. Msc. Flávio Nunes Pereira
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Msc. Antonio Vinicius Garcia Campos
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Msc. Reginaldo Nunes da Silva
Universidade Estadual do Maranhão

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, de de 2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, a senhorita Maria da Conceição Pereira Silva e ao senhor Valternilson Brito da Silva, assim como a minha amada vó Maria da Paixão Pereira.

AGRADECIMENTOS

A Deus por Sua infinita bondade e misericórdia que me capacita e me dá forças para prosseguir nesta maravilhosa jornada chamada vida.

Aos meus pais por todo empenho, dedicação, amor e carinho. Em especial a minha mãe Maria da Conceição, minha maior amiga e meu orgulho, que sempre me incentivou a continuar os estudos e, alcançar meus objetivos mesmo diante as dificuldades. Ao meu pai Valternilson, meu exemplo de força, coragem e superação, que sempre se empenhou em dar o melhor para que eu pudesse ter todos os recursos necessários para o meu crescimento social e intelectual. A minha amada Vó Cotinha, minha parceira de oração e minha grande amiga, que sempre me encorajou a seguir em frente, e sempre foi disposta a me animar com suas palavras e seus caprichos na culinária.

A minha amada Leiliane, por sua paciência, carinho, orações e toda alegria que provem de seu coração manso e humilde.

A meu orientador, Professor Flávio Nunes pelo conhecimento e por todo o auxílio prestado para a realização deste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica, pelo aprendizado que me foi passado ao longo destes anos.

A todos meus colegas de curso, assim como demais amigos e familiares que sempre estiveram na torcida por mais essa conquista.

A toda equipe da empresa Frango Americano que me auxiliaram durante todas as pesquisas de campo, em especial a equipe da manutenção industrial, liderada pelo senhor Reinaldo.

“O homem que teme a homens cairá em armadilhas, mas aquele que confia no Senhor estará seguro. ” – Provérbios 29.25

RESUMO

A análise de vibração em estruturas industriais, tem se tornado uma ferramenta indispensável para melhorar a confiabilidade e segurança das fábricas. Este trabalho apresenta a Análise Modal realizada em uma estrutura metálica que serve como fundação de um sistema mecânico rotativo. A análise consiste no conhecimento das frequências naturais da estrutura, e suas demais características, buscando avaliar o seu comportamento vibracional e as possíveis falhas que podem se originar devido às vibrações mecânicas. Em regime de trabalho as forças de excitação apresentam uma frequência natural característica, logo a análise também investigará a possível ocorrência do fenômeno da ressonância. O estudo baseia-se em pesquisas de campo, e com o uso de softwares de engenharia capazes de facilitar a análise e os cálculos para melhores conclusões a respeito do trabalho proposto. A modelagem da estrutura foi realizada no Solidworks, e sua simulação, assim como a aplicação do Método dos Elementos Finitos para conhecimento de suas frequências naturais foram feitas no ANSYS. Com a realização do trabalho pôde-se notar os efeitos das vibrações mecânicas sob a estrutura, e a atenção necessária para o conhecimento de suas propriedades dinâmicas para um possível controle do seu comportamento vibracional.

Palavras chaves: Análise de Vibração, Análise modal, Frequências Naturais, Ressonância, Método dos Elementos Finitos

ABSTRACT

The analysis of vibration in industrial structures, has become an indispensable tool to improve the reliability and safety of the factories. This work presents the Modal Analysis performed on a metallic structure which serves as the foundation of a rotative mechanical system. The analysis consists in the knowledge of the natural frequency of the structure, and their other characteristics, seeking to evaluate your vibrational behavior and the possible glitches that may originate due to mechanical vibration. Under excitation forces work present a natural frequency characteristic, soon the analysis also will investigate the possible occurrence of the phenomenon of resonance. The study is based on field research, and with the use of engineering software able to facilitate the analysis and calculations for best conclusions with respect to the proposed work. The modeling of the structure was performed in Solidworks, and your simulation, as well as the application of finite element method for notice of its natural frequencies were made in ANSYS. With the completion of work one could notice the effects of the mechanical vibrations in the structure, and the necessary attention to the knowledge of their dynamic properties for possible control of your vibrational behavior.

Keywords: Vibration Analysis, Modal Analysis, Natural Frequencies, Resonance, Finite Element Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 2 - Sistema massa-mola-amortecedor..... | 4 |
| Figura 2.1 - Oscilação de um pêndulo simples..... | 5 |
| Figura 2.2 – Sistema vibratório livre com e sem amortecimento..... | 6 |
| Figura 2.3 – Representação da amplitude X, em resposta a um sinal harmônico..... | 8 |
| Figura 2.4 – Elementos de conhecimento de uma falha..... | 11 |
| Figura 2.5 – Ponte de Tacoma Narrows durante colapso..... | 12 |
| Figura 2.6 – Esquema básico para medição de vibração..... | 13 |
| Figura 2.7 – Nomograma de vibração e critérios de vibração..... | 14 |
| Figura 3.1 – Vista lateral da estrutura a ser analisada junto ao sistema mecânico..... | 21 |
| Figura 3.2 – Celular usado como medidor de vibração..... | 22 |
| Figura 3.3 – Representação dos eixos do acelerômetro do celular..... | 22 |
| Figura 3.4 – Imagem da tela do celular utilizando o VibSensor | 23 |
| Figura 3.5 – Imagem dos gráficos nos respectivos pontos medidos pelo VibSensor..... | 24 |
| Figura 3.6 – Vista frontal da estrutura e do sistema mecânico rotativo modelados no solidworks.... | 25 |
| Figura 3.7 – Modelagem do sistema mecânico sobre a estrutura desenvolvido no solidworks..... | 26 |
| Figura 3.8 – Vista isométrica da estrutura modelada no solidworks..... | 26 |
| Figura 3.9 – Estrutura importada para o ANSYS..... | 27 |
| Figura 3.10– Visita Técnica na Fábrica..... | 28 |
| Figura 3.11 – Imagem da Fábrica..... | 29 |
| Figura 3.12 – Fluxograma dos setores da fábrica..... | 30 |
| Figura 3.13 – Fluxograma dos principais processos fabris em uma fábrica de ração | 31 |
| Figura 3.14 – Visita Técnica na Fábrica..... | 32 |
| Figura 3.14 – Medições das vibrações na estrutura..... | 32 |
| Figura 3.15 - Uso do celular para medir as vibrações..... | 33 |
| Figura 3.16 – Imagem da Estrutura com as respectivas frequências coletadas pelo VibSensor..... | 33 |
| Figura 4.1 – 1º Modo de Vibrar sem aplicação da massa..... | 35 |
| Figura 4.2 – 1º Modo de Vibrar com aplicação da massa..... | 36 |
| Figura 4.3 – 2º Modo de Vibrar sem aplicação da massa..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4 – 2º Modo de Vibrar com aplicação da massa..... | 37 |
| Figura 4.5 – 3º Modo de Vibrar sem aplicação da massa..... | 37 |
| Figura 4.6 – 3º Modo de Vibrar com aplicação da massa..... | 38 |
| Figura 4.7 – 4º Modo de Vibrar sem aplicação da massa..... | 38 |
| Figura 4.8 – 4º Modo de Vibrar com aplicação da massa..... | 39 |
| Figura 4.9 – 5º Modo de Vibrar sem aplicação da massa..... | 39 |
| Figura 4.10 – 5º Modo de Vibrar com aplicação da massa..... | 40 |
| Figura 4.11 – 6º Modo de Vibrar sem aplicação da massa..... | 40 |
| Figura 4.12 – 6º Modo de Vibrar com aplicação da massa..... | 41 |
| Figura 4.13 – Entrada da ração e saída do óleo contido no moinho..... | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Frequências naturais da estrutura com e sem aplicação da massa..... | 34 |
| Tabela 2 – Frequências naturais próximas a frequência presente na estrutura..... | 42 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----|-----------------------------------|
| CAD | Desenho com auxílio de computador |
| CAE | Computer Aided Engineering |
| FEA | Finite Element Analysis |
| GDL | Graus de Liberdade |
| MEF | Método de Elementos Finitos |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|--------------------|
| c | Amortecedor |
| g | Força da gravidade |
| k | Mola |
| Hz | Hertz |
| l | Comprimento |
| m | Massa |
| t | Tempo |
| x | Deslocamento |
| ω_n | Frequência natural |

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| FOLHA DE APROVAÇÃO | iv |
| AGRADECIMENTOS..... | vi |
| RESUMO | viii |
| ABSTRACT | ix |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | x |
| LISTA DE TABELAS..... | xii |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | xiii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xiv |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA..... | 2 |
| 1.2 OBJETIVOS | 2 |
| 1.2.1 Geral..... | 2 |
| 1.2.2 Específico | 3 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 4 |
| 2.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS | 4 |
| 2.2 CONCEITOS BÁSICOS | 8 |
| 2.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO | 10 |
| 2.4 ANÁLISE DE ESTRUTURAS..... | 15 |
| 2.5 ANÁLISE MODAL | 16 |
| 2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS..... | 17 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 20 |
| 3.1 MATERIAIS | 20 |
| 3.1.1 Estrutura | 20 |
| 3.1.2 Celular..... | 21 |
| 3.1.3 Aplicativo VibSensor..... | 23 |
| 3.1.4 Solidworks..... | 25 |
| 3.1.5 Ansys Workbench..... | 27 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | MÉTODOS | 28 |
| 3.2.1 | Identificação da Fábrica | 29 |
| 3.2.2 | Caracterização da Estrutura..... | 31 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 34 |
| 4.1 | ANÁLISE MODAL..... | 34 |
| 4.2 | ANÁLISE DA VIBRAÇÃO NA ESTRUTURA..... | 41 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 44 |
| 6 | SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS..... | 45 |
| | REFERÊNCIAS..... | 46 |

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho fora realizado uma análise do comportamento vibracional de uma estrutura que suporta um sistema mecânico rotativo de suma importância para a fábrica de rações da Frango Americano, localizada em Paço do Lumiar – MA. O estudo se baseia na análise modal da estrutura, juntamente com a simulação numérica por meio do Método de Elementos Finitos (MEF) utilizando o software ANSYS, com o objetivo de encontrar as frequências naturais da estrutura e a frequência de excitação proveniente do sistema mecânico rotativo, verificando a possível ocorrência do fenômeno da ressonância, e demais falhas que podem se manifestar devido a presença de vibrações.

Segundo Monchy (1987) a produção é o objetivo prioritário da empresa, e a manutenção é a “ajuda para a produção”. A manutenção pode ser entendida como uma gerencia otimizada do parque de equipamentos, no qual a otimização só pode ser feita em função de objetivos que devem ser claramente definidos a partir do conhecimento de três fatores:

- Fator econômico: menores custos de falha, menores custos diretos de prestação;
- Fator humano: condições de trabalho, segurança e fatores prejudiciais;
- Fator técnico: disponibilidade e durabilidade das maquinas.

Sendo os objetivos o atendimento preciso, a missão do serviço de manutenção consiste agora em dominar o comportamento dos equipamentos e gerenciar meios necessários ao seu trabalho.

Neste cenário, o uso da manutenção industrial não consiste apenas no conserto e reparo de máquinas, mas também em evitar a degradação dos equipamentos e instalações, ou seja, as empresas tiveram como necessidade o domínio sobre todos os seus equipamentos para manter a gestão estratégica em vista a suas metas. Para tanto, o gerenciamento da manutenção deve visar não só as máquinas, mas também todas as estruturas que envolvem o sistema. Pensando nisso as tendências atuais de manutenção e engenharia estão considerando ainda mais a qualidade das estruturas industriais, vendo que já ocorreram diversos acidentes devido os projetistas e engenheiros desprezarem os efeitos e as consequências das vibrações nas origens de falhas que rodeiam o sistema.

Sendo assim, a atenção com a manutenção e o monitoramento das máquinas e estruturas, tornaram-se indispensáveis para a prevenção de falhas, e para tal monitoramento, a análise de vibrações é uma das principais técnicas de engenharia utilizada neste intuito.

1.1 JUSTIFICATIVA

A importância de uma análise modal em uma estrutura mecânica se baseia no fato de que a análise identifica as propriedades dinâmicas das estruturas que controlam o seu comportamento. Este conhecimento, obtido através da análise, pode ser usado para prever ou controlar a performance dinâmica da estrutura (DE ALMEIDA,1990).

Os problemas ocasionados pelas vibrações mecânicas nas máquinas sempre foram objetos de estudos na análise de vibrações, porém com o avanço desses estudos, as estruturas passaram a ganhar novos olhares a respeito de como se comportam em relação as forças de excitação provenientes das maquinas e como prever possíveis falhas originadas pelas vibrações.

O tema escolhido se deu em função dos inúmeros riscos operacionais existentes em uma fábrica de ração e a importância do estudo da análise de vibração em estruturas industriais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Analisar o comportamento vibracional de uma estrutura industrial que está sujeita a uma força de excitação provinda de um sistema mecânico rotativo. Demonstrando assim a importância do conhecimento das propriedades dinâmicas da estrutura, para um melhor controle do seu estado físico e para prever possíveis falhas ocasionadas pelas vibrações mecânicas.

1.2.2 Específico

- Identificar as propriedades físicas e geométricas da estrutura.
- Avaliar as condições de contorno do sistema mecânico em análise.
- Fazer a modelagem da estrutura no software Solidworks.
- Fazer a aplicação do MEF para a determinação das frequências naturais da estrutura, via ANSYS.
- Analisar os resultados obtidos e elaborar as conclusões.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

A maioria das atividades humanas envolve vibração de uma forma ou outra. Os primeiros estudiosos concentraram seus esforços no entendimento dos fenômenos naturais e no desenvolvimento de teorias matemáticas para descrever a vibração de sistemas físicos. Mais recentemente, muitas investigações foram motivadas pelas aplicações da vibração na área de engenharia, como projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistemas de controle (RAO 2008, p. 5).

Segundo RAO (2008), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração. Em geral, um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial, caracterizado por uma mola, um meio para armazenar energia cinética, caracterizado por uma massa, e um meio para a perda gradual de energia, caracterizada por um amortecedor. A Figura 2, apresenta todos os elementos básicos presentes em um sistema vibratório com 1 grau de liberdade, onde m_{eq} , k_{eq} e c_{eq} são respectivamente a massa equivalente, rigidez equivalente e amortecimento viscoso equivalente.

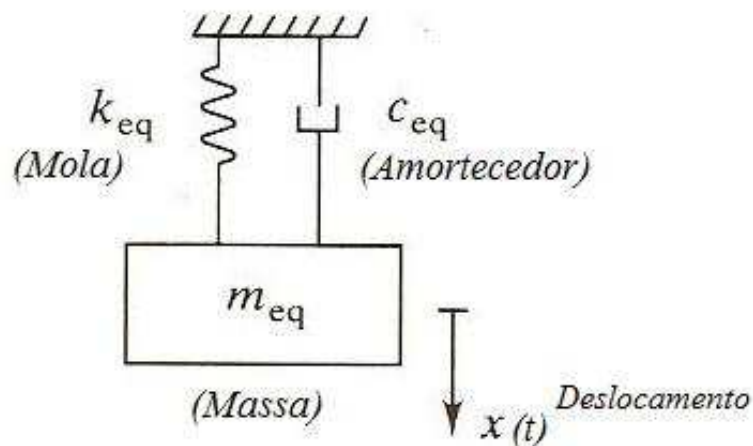


Figura 2 - Sistema massa-mola-amortecedor (RAO,2008).

As propriedades mais importantes dos sistemas mecânicos sob o aspecto da vibração são a elasticidade, a inércia e o amortecimento. Isso porque a vibração é, em essência, um processo de troca de energia mecânica, nas formas de energia cinética (associada à velocidade) e energia potencial (associada à deformação e à gravidade). A elasticidade é uma característica que se relaciona com a capacidade do sistema de armazenar energia potencial elástica. A inércia, por sua vez, se liga à capacidade de armazenamento de energia cinética e, também, energia potencial gravitacional. O amortecimento, finalmente, provoca as perdas de energia em função das resistências passivas pelo atrito e outros efeitos. Resumindo, em um sistema vibratório de parâmetros concentrados podemos classificar os elementos que o compõem segundo a forma com que manipulam a energia mecânica (SOEIRO 2008).

A classificação das vibrações, segundo RAO (2008), é tomada com base diversos aspectos presentes num dado sistema mecânico, e dentre tais classificações podemos citar:

a) Quanto a presença (ou não) de Forças Externas :

- **Vibrações livres:** se um sistema, após uma perturbação inicial, continuar a vibrar por conta própria, a vibração resultante é conhecida como vibração livre não amortecida. Ou seja, nenhuma força externa age sobre o sistema. A oscilação de um pêndulo simples, como mostrado na Figura 2.1, é um exemplo deste tipo de vibração.

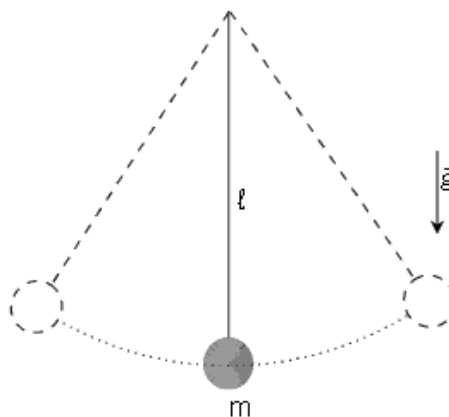


Figura 2.1 - Oscilação de um pêndulo simples (RAO,2008).

- **Vibrações forçadas:** se um sistema estiver sujeito a uma força externa (muitas vezes, uma força repetitiva), a vibração resultante é conhecida como vibração forçada. Este tipo de vibração é muito frequente em máquinas, como motores a diesel.

b) Quanto a presença (ou não) de Amortecimento:

- **Vibrações Amortecidas:** são vibrações que sofrem uma perda ou dissipação de energia, seja por atrito ou por qualquer outro tipo de resistência presente no sistema mecânico.

- **Vibrações Não Amortecidas:** se nenhuma energia for perdida ou dissipada por atrito ou outra resistência durante a oscilação, a vibração é conhecida como vibração não amortecida. Em muitos sistemas físicos, a quantidade de amortecimento é tão pequena que pode ser desprezada para a maioria das finalidades de engenharia.

A Figura 2.2 mostra a comparação entre os gráficos de um sistema mecânico com amortecimento, apresentando amplitudes mais baixas, e um sistema mecânico sem amortecimento, representado com amplitudes de vibrações mais elevadas.

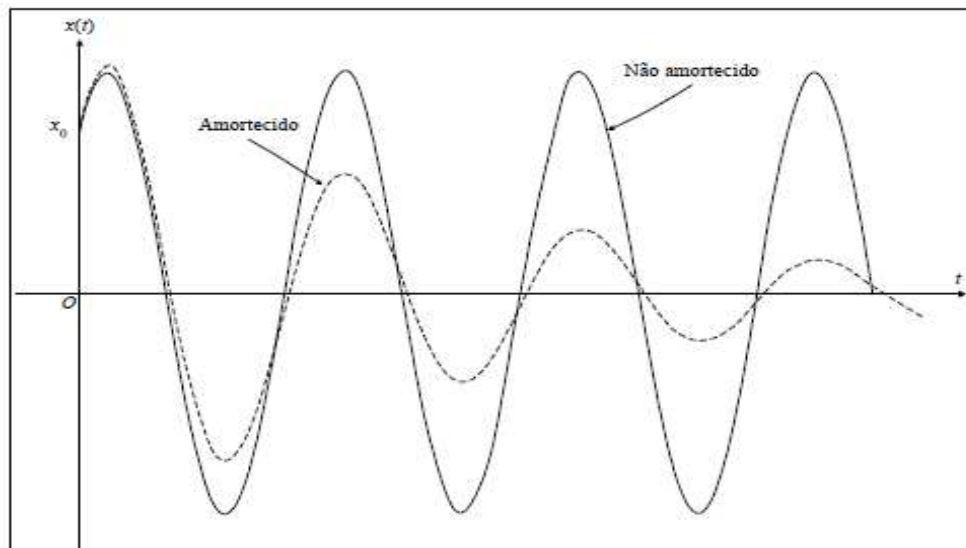


Figura 2.2 – Sistema vibratório livre com e sem amortecimento (RAO,2008).

c) Quanto a Magnitude da Força Perturbadora:

- **Vibrações Determinísticas:** se a magnitude da excitação (força ou movimento) que está agindo sobre um sistema vibratório for conhecido a qualquer dado instante, a excitação é conhecida por excitação determinística, o que resultara numa vibração determinística.

- **Vibrações Aleatórias:** quando o valor da excitação em um dado instante não pode ser previsto, temos então uma excitação aleatória, e a sua vibração resultante será denominada vibração aleatória.

d) Quanto a Linearidade (ou não) do sistema:

- **Vibração Linear:** se todos os componentes básicos de um sistema vibratório – a mola, a massa, e o amortecedor – comportarem-se linearmente, a vibração resultante é conhecida com vibração linear.

- **Vibração Não Linear:** se qualquer que seja dos componentes básicos do sistema vibratório se comportar não linearmente, a vibração é dita por vibração não linear.

e) Quanto ao número de Graus de Liberdade

O número de graus de liberdade (GDL) é o número mínimo de coordenadas independentes requeridas para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema a qualquer instante.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS

Segundo RAO (2008), o movimento de vibração pode se repetir regularmente, como no caso de um pêndulo simples, ou pode apresentar considerável irregularidade, como acontece com o movimento do solo durante um terremoto. Se o movimento for repetido a intervalos de tempo iguais, é denominado movimento periódico, e o tipo mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico.

Para o melhor estudo das vibrações mecânicas para os casos de movimento harmônico e outros tipos de funções periódicas, são necessários alguns conceitos fundamentais para o mesmo. A seguir, serão definidas algumas das características fundamentais dos movimentos harmônicos, e que auxiliarão na compreensão e no andamento do trabalho.

○ **Amplitude:** É o máximo deslocamento de um corpo vibratório em relação à sua posição de equilíbrio (RAO,2008). Na Figura 2.3, temos a representação gráfica da amplitude de um sistema em resposta a uma força de excitação.

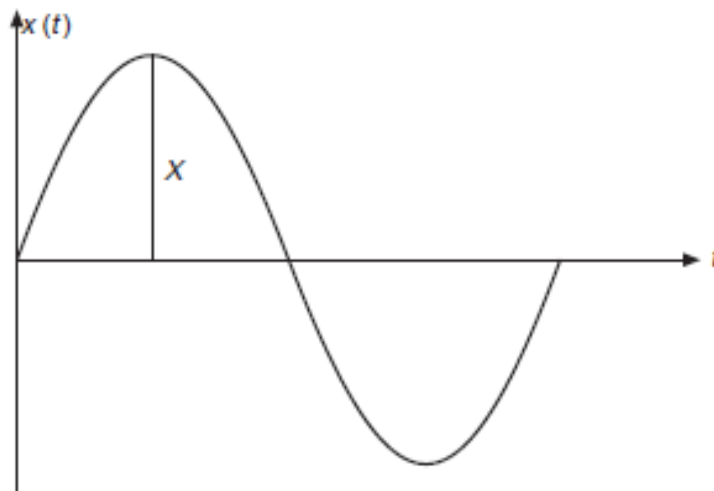


Figura 2.3 – Representação da amplitude X , em resposta a um sinal harmônico (HE, 2001)

- **Excitação:** É a solicitação externa aplicada a um sistema, que o leva a responder de certa maneira.

- **Frequência natural:** Se, após uma perturbação inicial, um sistema continuar a vibrar por si próprio sem a ação de forças externas, a frequência com que ele oscila é conhecida como sua frequência natural. (RAO, 2008). Por se tratar de uma vibração livre, uma estrutura pode apresentar várias frequências naturais, onde a sua primeira frequência é tratada como sua frequência fundamental, já que é a menor dentre as demais.

- **Modo de vibração:** Os modos de vibração dizem respeito à forma que o sistema assume quando exposto a determinadas frequências e que SILVA (2009, p.173) define como sendo as possíveis configurações que uma estrutura pode admitir em vibração livre sob determinadas frequências naturais.

- **Resposta (de um sistema):** Expressão quantitativa da reação de saída de um sistema.

- **Ressonância:** As vibrações forçadas ocorrem com a frequência da força excitadora e se mantém através do trabalho realizado por essa força. Ao coincidir a frequência da força excitadora com a natural, o sistema entra no fenômeno de ressonância que se caracteriza por grande aumento das amplitudes de vibrações flexionais do sistema, podendo causar fadiga ou seu colapso. (RAO,2008).

- **Rigidez:** Relação entre a variação de força e a variação correspondente do deslocamento em translação ou rotação de um elemento elástico.

- **Sistema mecânico:** Conjunto material apresentando uma configuração definida de massa, rigidez e amortecimento.

2.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Há numerosas fontes de vibração em um ambiente industrial: processos de impacto como limpeza por jateamento, maquinaria rotativa e alternativa como motores, compressores e máquinas motrizes, veículos de transporte como caminhões, o fluxo de fluidos e muitas outras. A presença de vibração muitas vezes resulta em desgaste excessivo de mancais, formação de trincas, afrouxamento de parafusos, falhas estruturais e mecânicas, manutenção frequente e dispendiosa em máquinas, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos devido a fraturas de juntas de soldadas e abrasão do isolamento ao redor de condutores elétricos causando curtos-circuitos.

Às vezes, a vibração pode ser eliminada com base na análise teórica. Todavia, os custos de fabricação envolvidos em eliminar a vibração podem ser demasiadamente altos, o projetista deve procurar uma solução de compromisso entre uma quantidade aceitável de vibração e um custo de fabricação razoável (RAO, 2008).

Geralmente as vibrações que ocorrem nas máquinas e estruturas são indesejáveis, isso devido os ruídos e as tensões dinâmicas, que causam fadiga e conseqüentemente falha na estrutura, além das perdas de energia e a redução na performance que acompanham as vibrações (ALMEIDA, 1990).

Uma análise de vibração no âmbito da engenharia, tem como foco o estudo do comportamento vibracional de um sistema mecânico não para reparar uma falha, mas sim para indicar as possíveis origens das vibrações e então suas possíveis conseqüências.

Segundo MONCHY (1987, p.71), toda falha presente num sistema mecânico apresenta seis elementos que a regem, e cada uma desses elementos é exposto na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Elementos de conhecimento de uma falha (MONCHY, 1987).

Muitos problemas de ruído e vibração encontrados na fase de design ou na operação de uma estrutura são causados por ressonâncias, que podem causar amplificação mecânica forças operacionais normais, resultando em uma inaceitável resposta estrutural (BRUEL & KJAER, 1988).

A literatura é rica de exemplos de falhas em sistemas causados por vibrações excessivas em virtude de ressonância. Um destes exemplos é o da ponte de Tacoma Narrows, localizada nos Estados Unidos, inaugurada em julho de 1940, e que deve seu colapso em 7 de novembro do mesmo ano quando entrou em ressonância induzida pelo vento, como mostrada na Figura 2.5 (SOEIRO 2008).



Figura 2.5 – Ponte de Tacoma Narrows durante colapso (RAO, 2008).

O caso da ponte Tacoma Narrows pode ser considerado uma falha humana, já que o vento que soprava no dia do seu colapso tinha uma frequência característica da região onde a ponte fora construída, ocasionando assim o fenômeno da ressonância, quando tal frequência coincidiu com uma das frequências naturais da ponte. Devido catástrofes, como a ocorrida na ponte de Tacoma, engenheiros e pesquisadores na área de vibrações mecânicas intensificaram os seus estudos para proporem os passos e a maneira mais correta possível para uma análise de vibração.

Segundo SOEIRO (2008), o estudo das análises de vibrações requer três passos básicos: a medição da vibração, a análise do sinal vibratório medido e o controle da vibração.

A análise exige que as vibrações sejam perfeitamente identificadas. Isto acontece por meio de um processo de medição. É extremamente importante a correta medição da vibração para que o processo de análise e a consequente correção não sejam comprometidos. A medição serve então para assegurar o bom funcionamento de sistemas mecânicos, confirmar suposições teóricas e auxiliar no projeto, além de ajudar no acompanhamento do estado de máquinas no processo da manutenção preditiva, manutenção essa que tem como um dos seus pilares a análise qualitativa e quantitativa das vibrações (SOEIRO, 2008).

O processo de medição, parte da identificação de uma característica do fenômeno vibratório que possa ser medida, geralmente uma variável física (deslocamento, velocidade, aceleração ou força). O elemento que entra em contato com a máquina para medir esta variável é o transdutor que cumpre a função de converter o sinal mecânico em um sinal elétrico que é amplificado e convertido em um sinal digital. Após armazenados, os dados estão disponíveis para a análise. (SOEIRO, 2008). Na Figura 2.6 temos um esquema básico para a medição de vibrações.

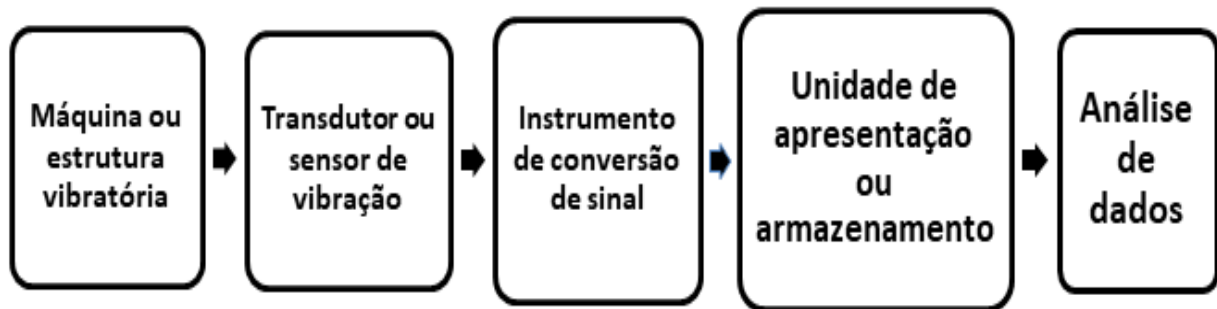


Figura 2.6 – Esquema básico para medição de vibração (Adaptado de SOEIRO,2008).

Através dos mais variados estudos e análises, estudiosos propuseram níveis de vibrações aceitáveis para todos os projetos de engenharia. Os níveis aceitáveis de vibração costumam ser especificados em termos da resposta de um sistema com um grau de liberdade não-amortecido sujeito à vibração harmônica. Os limites são mostrados em um gráfico, denominado nomograma

de vibração representado na Figura 2.7, o qual apresenta as variações das amplitudes de deslocamento, velocidade e aceleração em relação a frequência de vibração (RAO, 2008).

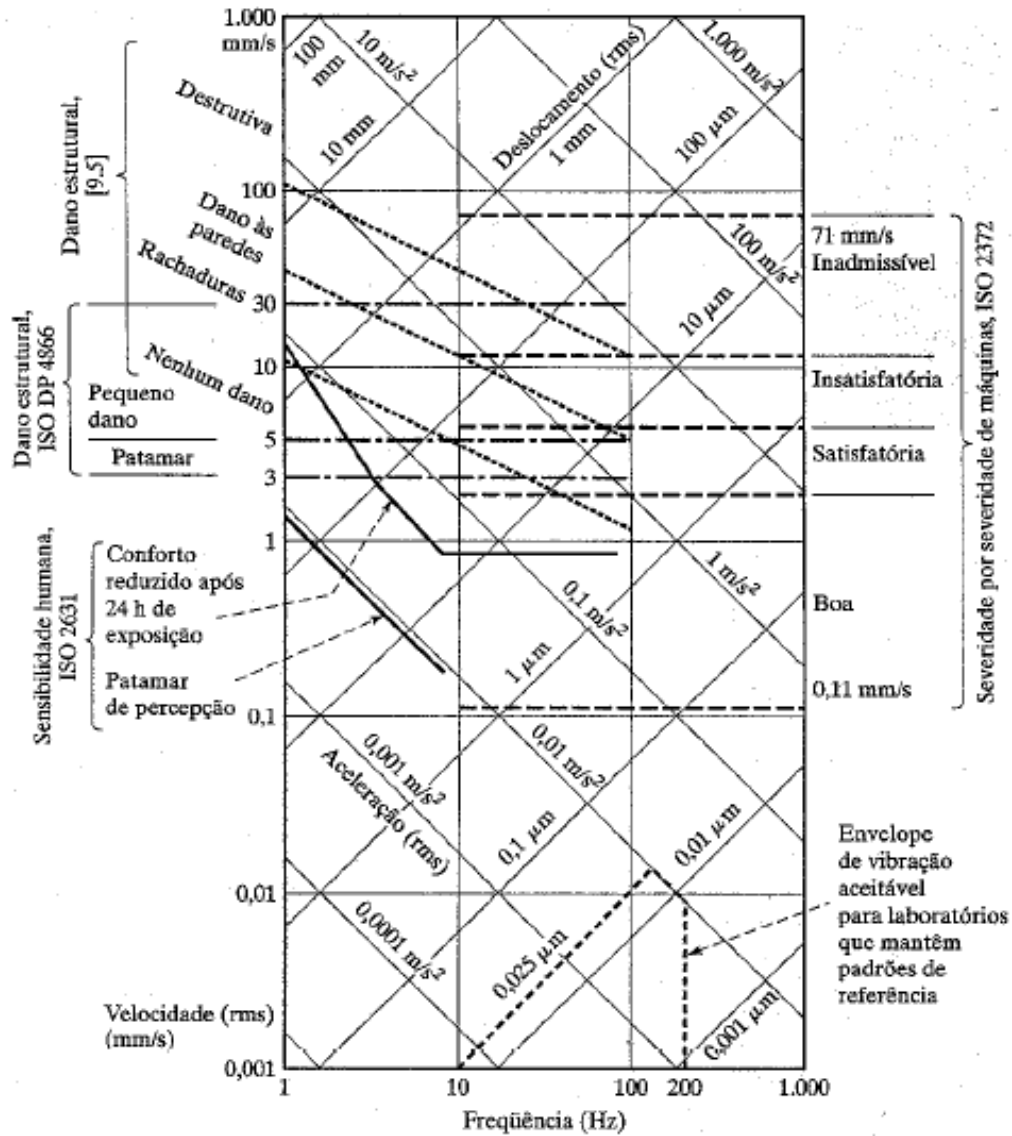


Figura 2.7 – Nomograma de vibração e critérios de vibração (INMAN, 2001).

2.4 ANÁLISE DE ESTRUTURAS

A análise estrutural é a parte da mecânica que estuda as estruturas, para a determinação dos esforços e das deformações a que elas ficam submetidas quando solicitadas por agentes externos (cargas, variações térmicas, movimento de seus apoios, etc.). As estruturas são compostas de uma ou mais peças, ligadas entre si e ao meio exterior de modo a formar um conjunto estável, isto é, um conjunto capaz de receber solicitações externas, absorve-las internamente e transmiti-las até seus apoios, onde estas solicitações externas encontrarão seu sistema estático equilibrante (SUSSEKIND 1981, p. 01).

Um dos principais objetivos da análise de estruturas é relacionar, em idealizações simplificadoras e utilizando propriedades de material determinadas experimentalmente, as ações externas atuantes com os deslocamentos, reações de apoio e tensões (ou suas resultantes), de maneira a poder identificar eventual deficiência de comportamento do material constituinte e/ou de comportamento da estrutura como um todo e/ou de suas partes. Isso, para elaborar o projeto de uma nova estrutura a ser construída ou estudar o comportamento de uma estrutura já existente. A idealização de uma estrutura conduz a um modelo de análise, exigido por equações matemáticas, cujos resultados devem expressar comportamento próximo ao da estrutura real. Cabe ao engenheiro a responsabilidade de conceber esse modelo, sob ações externas estabelecidas a partir de códigos de projeto e com as aproximações julgadas cabíveis, e, após a determinação de seu comportamento, fazer a análise crítica de sua pertinência. (SORIANO 2006, p. 06).

No desenvolvimento dos cálculos de uma estrutura, o sucesso dessa tarefa não está apenas condicionado ao conhecimento de um aparato matemático muitas vezes complicado, mas à capacidade que o engenheiro apresenta de entender a natureza física do fenômeno que se propõe a resolver. A identificação dos pontos relevantes do problema em estudo permite tecer hipóteses sobre o comportamento do sistema estrutural a ser analisado, que constituirão a base para um bom desenvolvimento do projeto em curso (ALVES FILHO 2000, p. 01).

Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução

satisfatória, quer em termos econômicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares (ALVARO, 2003).

Com o advento de estudos mais específicos para a análise de estruturas, podemos encontrar vários tipos de análises estruturais, dentre eles os mais comuns são: a análise estática, a análise dinâmica e a análise modal, que é instrumento do presente trabalho.

A análise estrutural estática calcula os efeitos de condições de carregamento estático na estrutura, ignorando efeitos de inercia e amortecimento, tais como os efeitos causados por cargas que variam em função do tempo. Este tipo de análise pode ser usado para determinar os deslocamentos, tensões, deformações estáticas e forças nas estruturas ou componentes causadas por cargas que não induzem significantes efeitos de inercia ou amortecimento. (AZEVEDO, 2016).

Na análise dinâmica temos um acréscimo da análise estrutural, pelo qual podemos determinar a resposta de uma estrutura sob cargas que variam no tempo e suas consequências em relação as respostas da estrutura levando em consideração os efeitos das ações de inercia.

E a análise modal, objeto de estudo deste trabalho, é utilizada para cálculos das frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura.

2.5 ANÁLISE MODAL

A importância de uma análise modal em uma estrutura mecânica se baseia no fato de que a análise identifica as propriedades dinâmicas das estruturas que controlam o seu comportamento. Este conhecimento, obtido através da análise, pode ser usado para prever ou controlar o desempenho dinâmico da estrutura (DE ALMEIDA, 1990).

A análise modal é uma ferramenta de engenharia para avaliar a resposta da estrutura devido à vibração. É importante considerar a consequência das vibrações ao projetar a estrutura para garantir que efeitos como ruído, desconforto e fadiga sejam reduzidos o máximo possível. A fonte mais comum e perturbadora são as vibrações de veículos e máquinas. As vibrações geradas pelo

meio ambiente (terremotos, furacões, tornados, etc.) são severas e podem causar danos permanentes à estrutura ou, na pior das hipóteses, destruição do cenário (KRISTENSSON, 2014).

Segundo HE (2001. p.02), a análise modal é o processo de determinação das características dinâmicas inerentes a um sistema em formas de frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração, e utilizando-os para formular um modelo matemático para o seu comportamento dinâmico. A análise é baseada no fato que a resposta de vibração de um sistema dinâmico linear invariante no tempo pode ser expressa como a combinação linear de um conjunto de movimentos harmônicos simples chamado modos naturais de vibração.

As propriedades modais de uma estrutura incluem principalmente suas frequências naturais, taxas de amortecimento e as formas de modo, que podem ser entendidas como o padrão de deslocamento característico da estrutura. São as características que governam a resposta de uma estrutura sob cargas dinâmicas, desempenhando um papel importante na análise e design. A resposta dinâmica é significativamente maior se a estrutura estiver em ressonância com o carregamento. O amortecimento está associado com dissipação de energia; quanto maior o amortecimento, menor a resposta (AU-KIU, 2017, p.03).

2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

RAO (2008), no início dos estudos das vibrações, mesmo os que tratavam de problemas complexos de engenharia, eram realizados com a utilização de modelos grosseiros, com apenas alguns graus de liberdade. Todavia, com o advento dos computadores ficou possível o tratamento de sistemas de moderada complexidade e a geração de soluções aproximadas em forma semi-definida recorrendo a métodos clássicos de solução. O desenvolvimento simultâneo do MEF habilitou os engenheiros a usar computadores digitais para realizar análises numericamente detalhadas de vibrações de sistemas mecânicos, veiculares e estruturais complexos que apresentam milhares de graus de liberdade.

Os programas de análises se utilizam das informações existentes nos arquivos dos desenhos feitos em programas de auxílio ao desenho com o computador (CAD) para definir os domínios da geometria, entre outras coisas, mas principalmente, simular a utilização peças ou conjuntos nas condições de utilização. Esta geometria da peça, que é originalmente contínua, é subdividida pelo programa de análise, em pequenos elementos, em uma quantidade finita, mantendo estes elementos interligados por nós, formando aquilo que denominamos malha, este processo chama-se 'Discretização'. E é desta divisão da geometria em elementos que surgiu o termo "análise pelo método de elementos finitos", pois é diferente do método analítico que utiliza infinitas partes. Após discretizar a geometria, o programa poderá então, durante a análise montar a equação matricial com os vetores e matriz de rigidez para calcular o deslocamento de cada um dos nós e as tensões naqueles pontos (AZEVEDO, 2016).

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o MEF tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e surge, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes, barragens, etc. Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares (ÁLVARO, 2003, p.01).

No MEF, toda estrutura é subdividida em partes denominadas elementos que são interligados em nós. A posição de cada um dos nós de um elemento e os graus de liberdade que este terá para movimentação é extremamente relevante para os cálculos realizados pelo software e quanto mais nós existirem, maior será a quantidade de cálculos a serem realizados. E a quantidade de nós depende diretamente da complexidade da estrutura e pode ser de apenas algumas dezenas de milhares de nós ou mais. Portanto, quanto mais complexa a estrutura, maior a quantidade de dados a serem processada pelo computador e mais demorada é a obtenção de resultados (ALVARO,2016).

Comparado aos métodos analíticos, o FEA apresenta algumas vantagens e desvantagens que

precisam de uma atenção especial a todos os engenheiros e projetistas que usam dessa ferramenta para análise de estruturas (PAVLOU, 2015).

- *Dentre as principais vantagens temos:*
 - Análise de problemas com geometria complexa.
 - Análise de problemas com o carregamento complexo.
 - Análise de uma grande variedade de problemas de engenharia.

- *E dentre as desvantagens temos:*
 - Os resultados do MEF são aproximados. Sua precisão depende do número de elementos, o tipo de elementos, as premissas utilizadas.
 - A precisão dos resultados do MEF depende da experiência do usuário do software, por exemplo, o uso do tipo errado, ou elementos distorcidos, apoios insuficientes para impedir que todos os movimentos de corpo rígido, e unidades diferentes para a mesma quantidade origina erros.

Os resultados obtidos com o MEF podem se aproximar bastante do resultado analítico e exato. Mas o próprio resultado analítico, assim como, com o MEF pode não ser igual ao que pode ocorrer na realidade, pois pode haver diferenças nas propriedades do material, geometria e carregamentos (AZEVEDO 2016, p.30).

A geometria real pode apresentar imperfeições devidas também a processos de fabricação, que podem afetar a distribuição de tensão internamente na peça ou em sua superfície. Processos de usinagem podem, eventualmente, deixar erros de forma ou marcas que geram concentração de tensões, processos de revestimento podem diminuir a resistência a fadiga da peça, os processos de fundição, forjamento e laminação, entre outros, podem produzir superfícies relativamente diferentes daquelas previstas no projeto. A verdadeira intensidade, orientação e posição de um carregamento pode ser diferente daquelas aplicadas na análise ou ter variações ao longo do tempo que não foram previstas no projeto e resultar em diferenças entre o que realmente ocorre e o comportamento obtido na simulação (AZEVEDO 2016, p.31).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAS

Os materiais e softwares para a realização deste trabalho serão listados e apresentados de forma breve com suas respectivas funções na elaboração do mesmo.

Os materiais utilizados na análise são:

- Estrutura
- Celular
- Aplicativo Vibsensor
- Software Solidworks
- Software ANSYS Workbench

3.1.1 Estrutura

Trata-se de uma estrutura metálica industrial que foi projetada para suportar o peso e as excitações de um sistema mecânico rotativo, composto por um motor, um redutor de velocidade e um moinho de ração, como mostrado nas Figura 3.1.

A estrutura é composta por aço A36 que apresenta uma resistência adequada para as finalidades do projeto. Com dimensões de 2550 mm x 2550 mm, e constituída por vigas em perfil I, com espessuras de 10 mm.

O peso do sistema, segundo a equipe de manutenção da fábrica e o funcionário responsável por seu projeto, foi estipulado em 2000 Kg, e mesmo trabalha constantemente, já que o seu processamento é essencial para a fábrica.

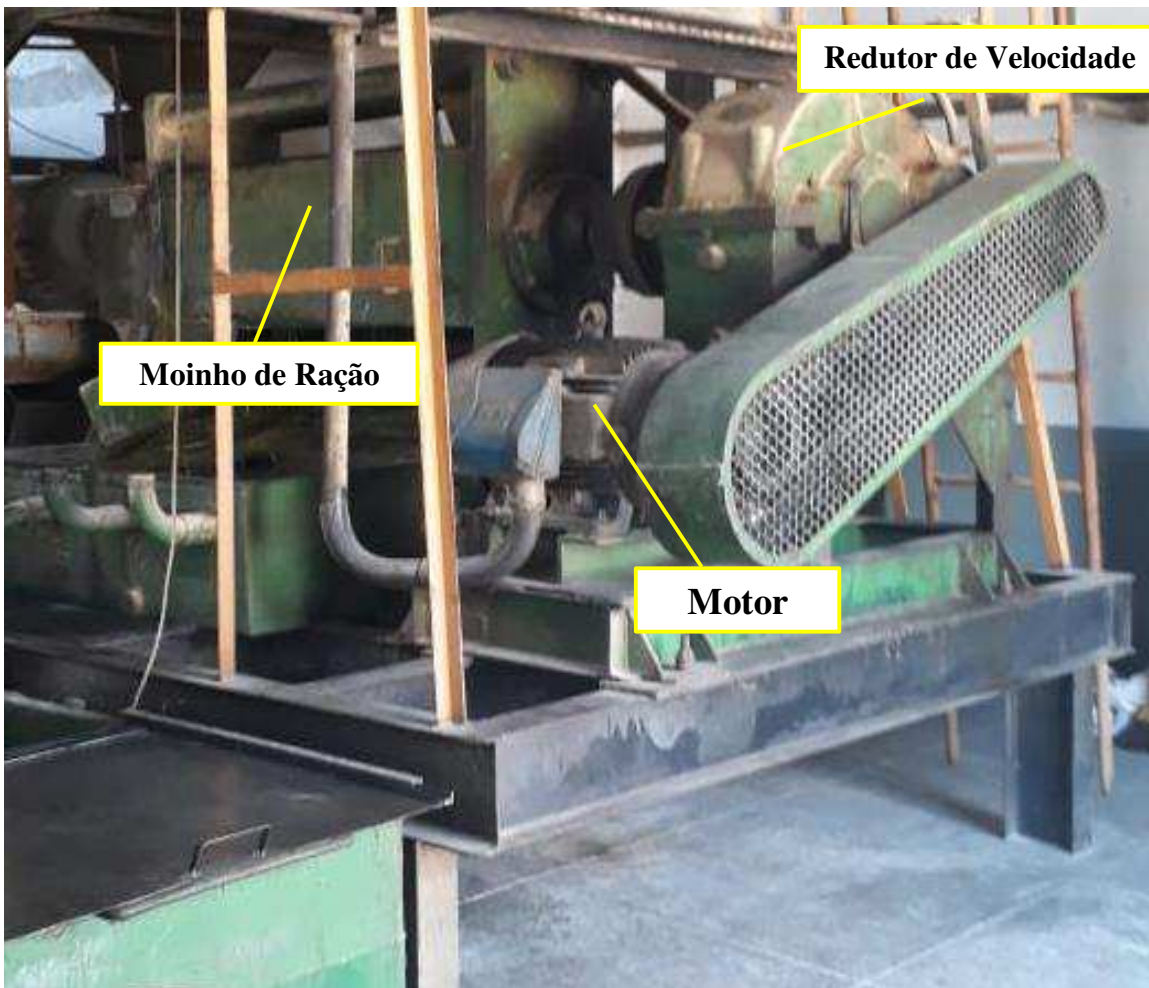


Figura 3.1 - Vista lateral da estrutura a ser analisada junto ao sistema mecânico (Fonte: Autor).

3.1.2 Celular

Para a medição da vibração na estrutura e o conhecimento das frequências naturais, o recomendável seria utilizar um medidor de vibração padrão, porém a iniciativa do uso do celular se deu devido sua simplicidade na coleta dos dados, e uma precisão adequada para a aplicação no trabalho, como mostrado na Figura 3.2.

Vale ressaltar que o uso aparelho não é recomendável para estudos mais específicos, já que ele não tem uma precisão tão sofisticada como aparelhos próprios para análises de vibrações. Mas para fins de estudo e elaboração deste trabalho, em vista apenas de compreender e observar a importância do estudo de vibrações mecânicas e da análise modal, foi possível fazer o seu uso.

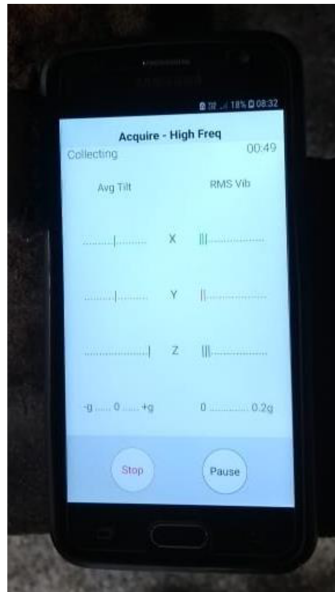


Figura 3.2 – Celular usado como medidor de vibração (Fonte: Autor).

Por convenção, o acelerômetro presente nos celulares tem sua medição ao longo de cada um dos eixos principais do dispositivo, e tais eixos são rotulados conforme a Figura 3.3.

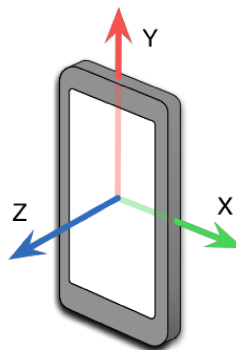


Figura 3.3 - Representação dos eixos do acelerômetro do celular (Now Instruments, 2019).

3.1.3 Aplicativo VibSensor

O VibSensor é um aplicativo para celular que tem como objetivo transformar o aparelho em um vibrômetro, isto é, em uma ferramenta capaz de fazer medições de vibração em contato com uma superfície. A escolha do aplicativo se deu devido a facilidade no armazenamento de dados, podendo fazer o uso de uma análise rápida e em tempo real, como demonstrado na Figura 3.4.

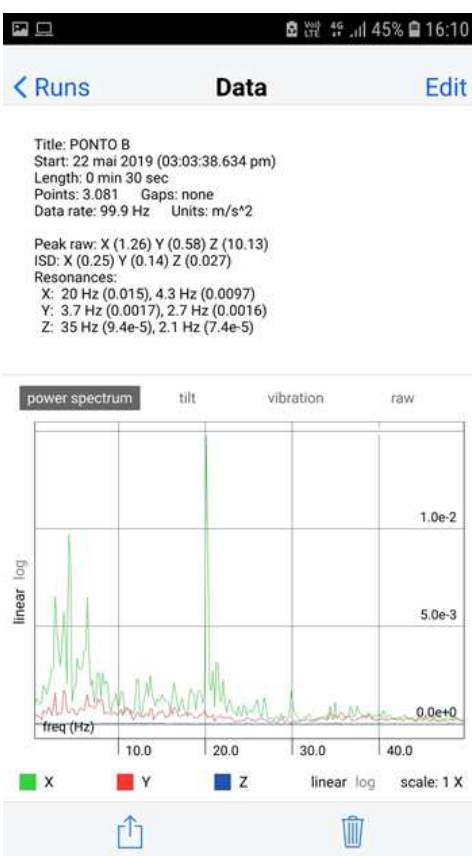


Figura 3.4 – Imagem da tela do celular utilizando o VibSensor (Fonte: Autor).

A medição das vibrações na estrutura se deu em seis pontos, e para cada ponto o Vibsensor apresentou seis gráficos distintos, como mostrado na Figura 3.5 a seguir.

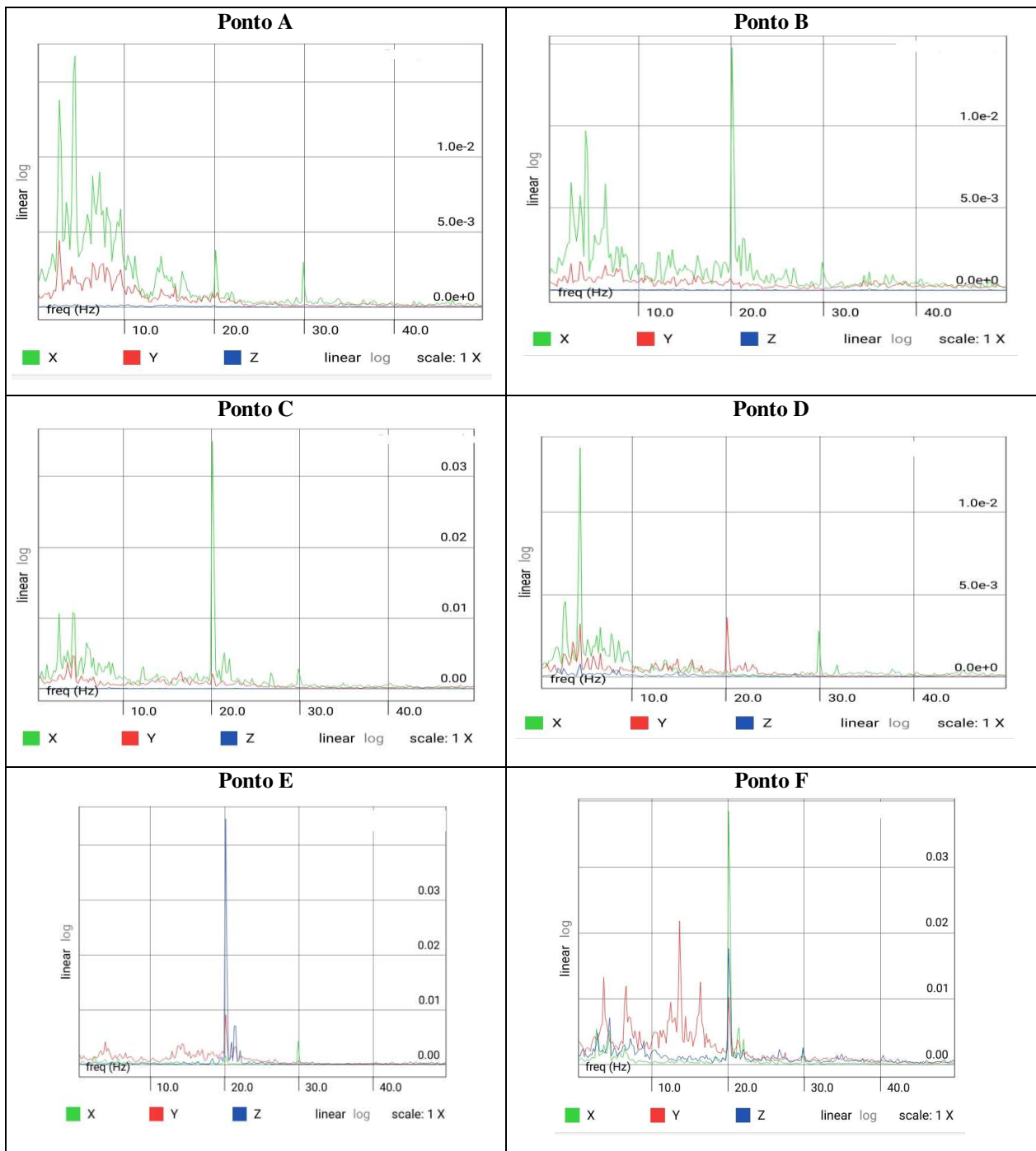


Figura 3.5 – Imagem dos gráficos nos respectivos pontos medidos pelo VibSensor (Fonte: Autor).

3.1.4 Solidworks

O Solidworks é um software CAD 3D completo e muito intuitivo. Na área da engenharia mecânica, é muito utilizado na modelagem de máquinas e de estruturas mecânicas para possíveis simulações dentro do próprio programa, ou até mesmo para serem simulados em outros softwares CAD dependendo da escolha do usuário.

A escolha do software no desenvolvimento deste trabalho se deu mediante a sua variedade de ferramentas para modelamento de superfícies e estruturas com geometrias complexas.

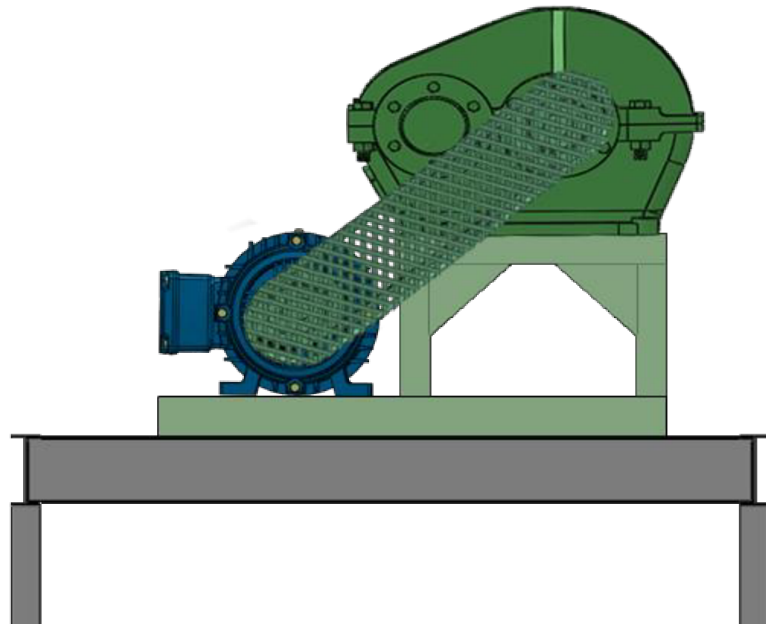


Figura 3.6 –Vista frontal da estrutura e do sistema mecânico rotativo modelados no solidworks
(Fonte: Autor).

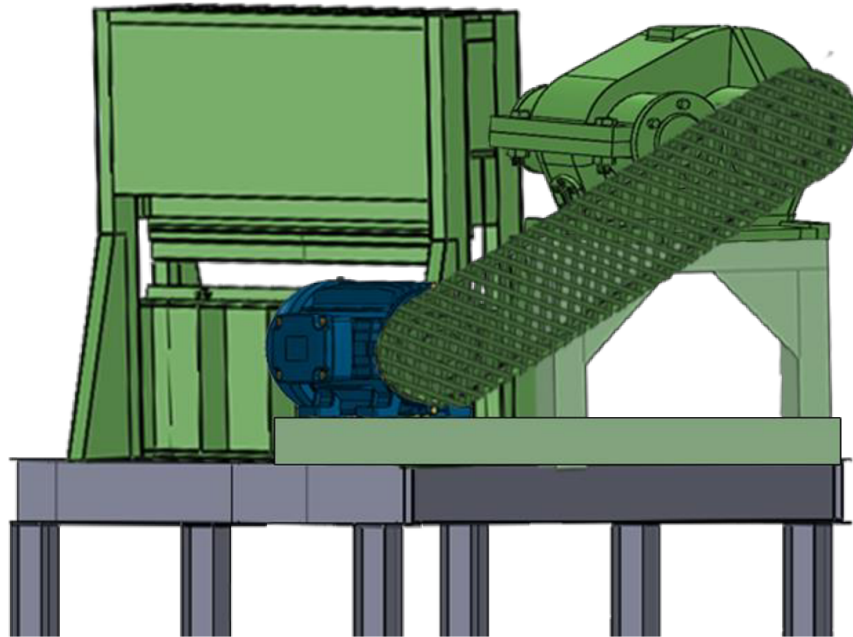


Figura 3.7 – Modelagem do sistema mecânico sobre a estrutura desenvolvido no solidworks (Fonte: Autor).

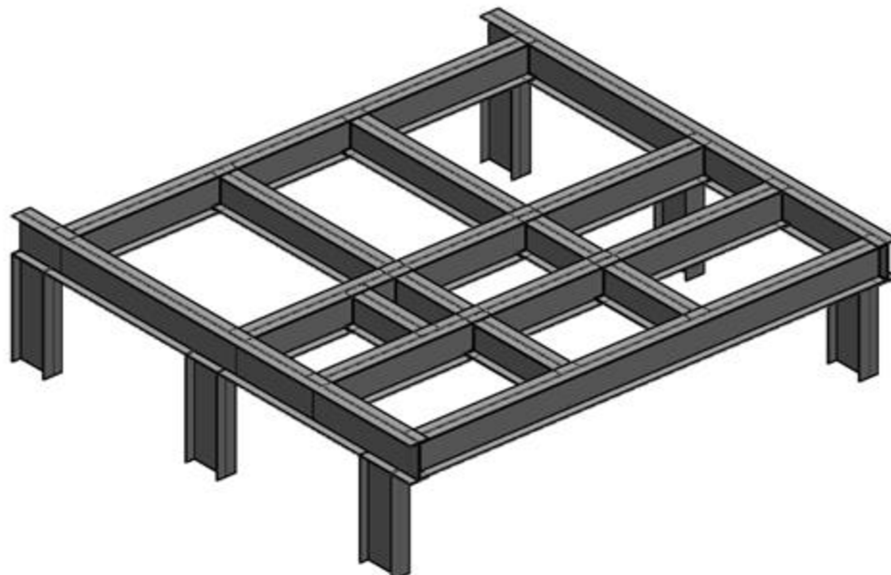


Figura 3.8 – Vista isométrica da estrutura modelada no solidworks (Fonte: Autor).

3.1.5 Ansys Workbench

O programa ANSYS Workbench é um dos vários programas de análises por método de elementos finitos existentes no mundo. O ANSYS Workbench se enquadra na categoria de programas CAE e tem a finalidade de auxiliar o engenheiro nas decisões de algumas das etapas do desenvolvimento de projeto, em particular para o dimensionamento e a validação de projetos.

De maneira geral os programas de CAE permitem:

- A redução do custo e tempo necessário no processo de desenvolvimento do projeto, pois é acelerado pela rapidez de análise.
- A melhoria coerente da peça ou conjunto antes da sua fabricação reduzindo os custos associados ao material, a manufatura e seu final.
- A redução da probabilidade de falha dos componentes, pois uma eventual falha pode ser percebida antes de sua execução.

O programa ANSYS Workbench mostra os resultados graficamente na tela permitindo identificação visual da geometria e resultados facilitando a interpretação do que está ocorrendo na peça ou conjunto. (AZEVEDO 2016, p.11).

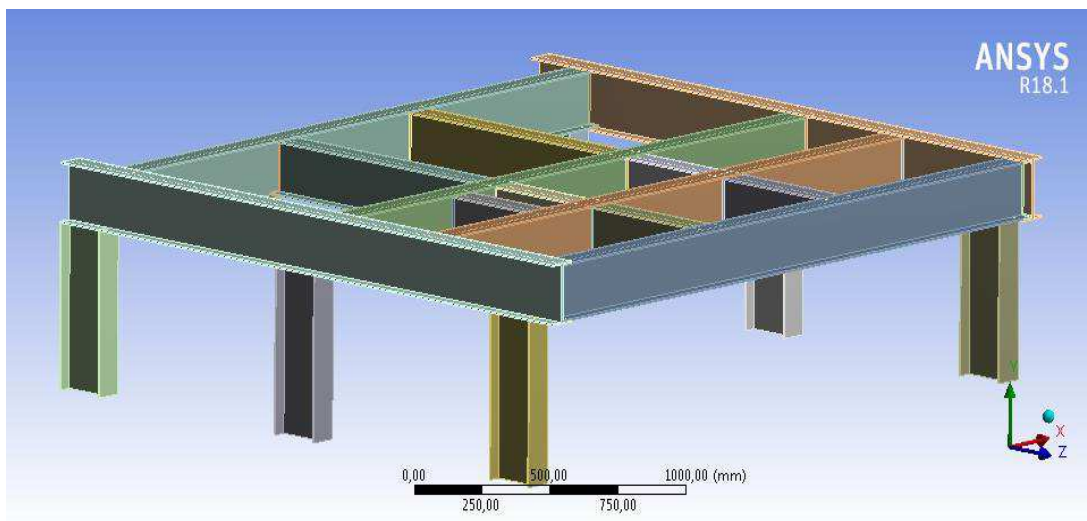


Figura 3.9 – Estrutura importada para o ANSYS (Fonte: Autor).

3.2 MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho foi realizar pesquisas a respeito da importância da análise modal e de como é possível realizar tal análise. Em seguida, fez-se uma visita técnica à fábrica no setor de extrusão, como mostrada na Figura 3.10, para a identificação das propriedades físicas e geométricas da estrutura. Foram avaliadas todas as condições de contorno, isto é, todos os carregamentos, apoios e demais propriedades necessárias para a análise.



Figura 3.10– Visita Técnica na Fábrica (Fonte: Autor).

Com o levantamento de todos os dados necessários, foi feita a modelagem da estrutura no programa Solidworks, para então o uso do ANSYS, que foi utilizado como o ambiente computacional para a simulação, análise e aplicação do MEF para a determinação das frequências naturais em estudo.

3.2.1 Identificação da Fábrica

Este trabalho foi realizado na fábrica de rações da Frango Americano, localizada em Paço do Lumiar – MA, mostrada na Figura 3.11. A Frango Americano é uma empresa que atua no ramo de avicultura no qual possui sua própria fábrica de rações.

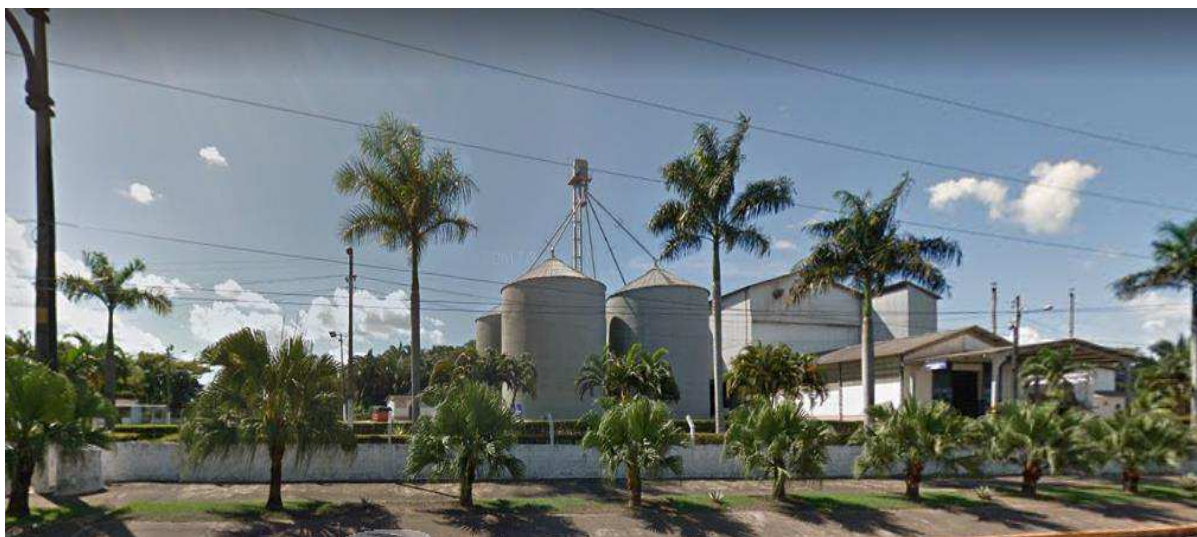


Figura 3.11 – Imagem da fábrica (Fonte: Autor).

A fábrica produz em média 180 toneladas de ração por dia. O processo fabril, mostrado na Figura 3.12, consiste inicialmente com o recebimento de matéria prima, constituída basicamente por soja e milho, e tem seu termino no setor de expedição, onde as rações aguardam o transporte para o seu destino final.

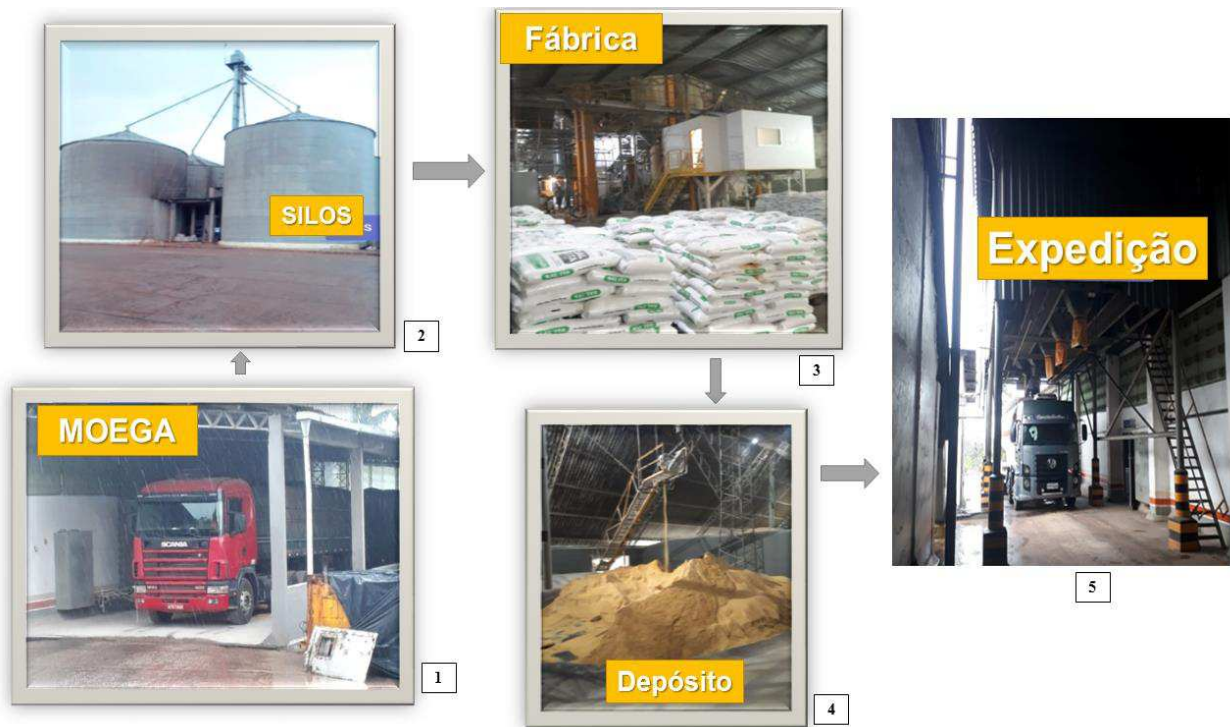


Figura 3.12– Fluxograma dos setores da fábrica (Fonte: Autor).

1. Recebimento da matéria-prima
2. Armazenamento da matéria-prima
3. Fabricação
4. Deposito
5. Expedição

A Figura 3.13 demonstra o fluxograma dos principais processos fabris existentes em uma fábrica de ração, no qual a empresa Frango Americano também segue para a fabricação dos seus produtos.

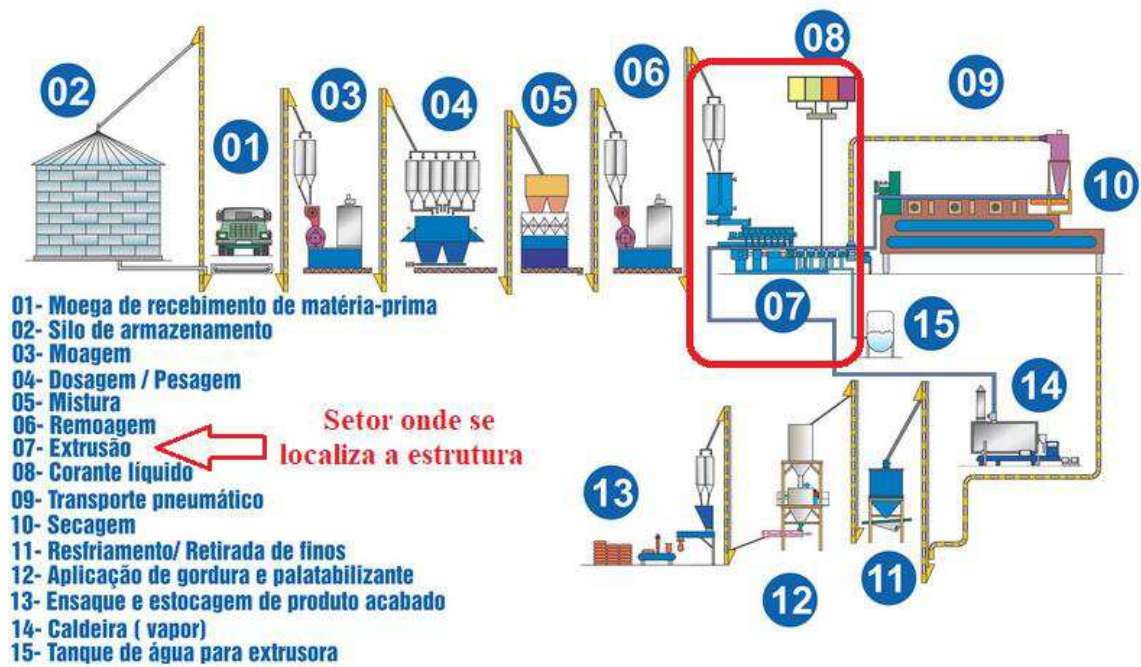


Figura 3.13 – Fluxograma dos principais processos fabris em uma fábrica de ração (Adaptado de Ferraz Máquinas, 2019).

3.2.2 Caracterização da Estrutura

Como já mencionado no item 3.1.1, a estrutura em análise foi projetada para suportar o peso e as constantes excitações de um sistema mecânico rotativo, composto por um motor, um redutor de velocidade e um moinho de ração, que estão presentes no setor de extrusão da fábrica. Além da carga do maquinário, a estrutura também retém uma parte da ração que é lançada continuamente para o moinho, proporcionando assim uma carga adicional sobre a estrutura.

Após a definição da estrutura e a identificação de suas propriedades físicas e geométricas, foram realizadas as medições de vibração para posterior análise. As medições foram feitas a partir do uso de celular pelo aplicativo VibSensor, conforme mostrado nas Figuras 3.14 e 3.15.



Figura 3.14 – Medições das vibrações na estrutura (Fonte: Autor).

Foram escolhidos seis pontos estratégicos para as medições, conforme mostrado na Figura 3.16. O ponto A se deu em função de ser o ponto próximo a saída do óleo contido no moinho. O ponto B, fica próximo do motor. O ponto C, se localiza nas proximidades do redutor de velocidade. O ponto D, por estar próximo a base do moinho. O ponto E, é a base do moinho e o ponto F, a base do motor.

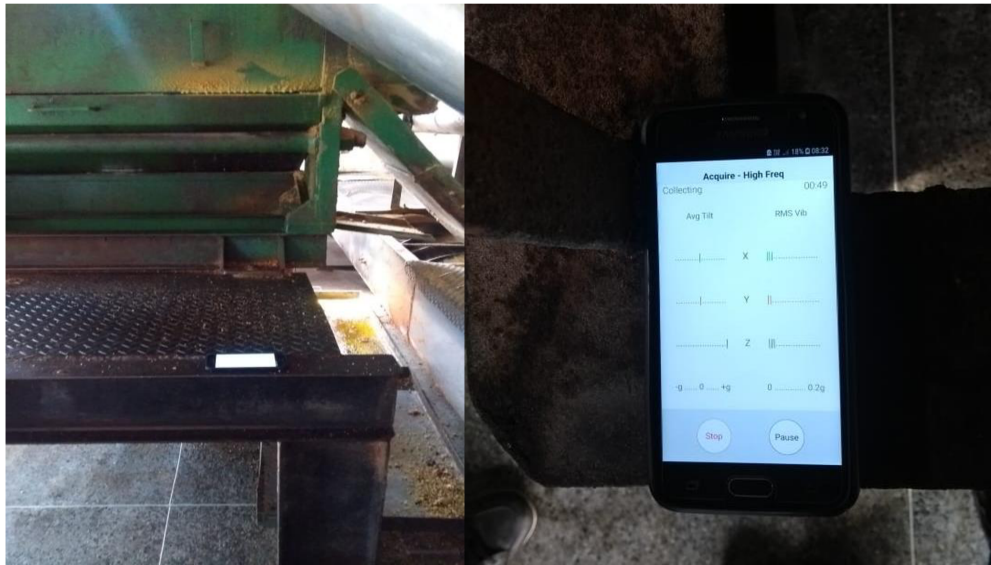


Figura 3.15 – Uso do celular para medir as vibrações (Fonte: Autor).

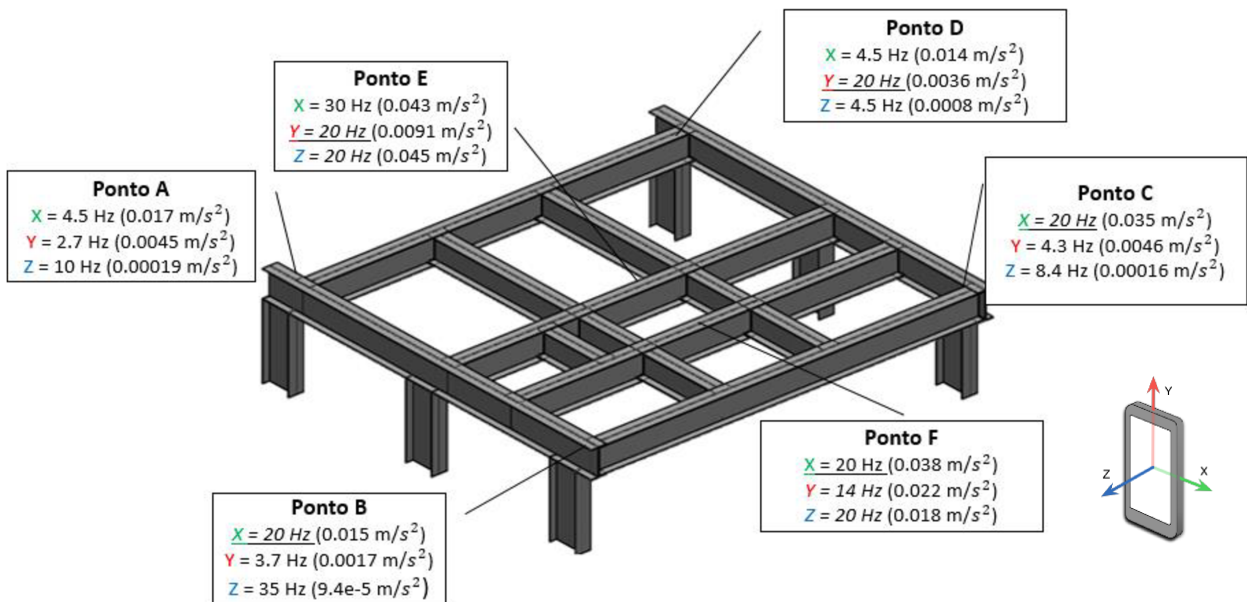


Figura 3.16 – Imagem da Estrutura com as respectivas frequências coletadas pelo VibSensor (Fonte: Autor).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE MODAL

A análise foi realizada em dois momentos. O primeiro considerando apenas as frequências naturais da estrutura, sem aplicação da massa do sistema mecânico rotativo, e o segundo momento com a aplicação da massa.

Tabela 1 – Frequências naturais da estrutura com e sem aplicação da massa (Fonte: Autor).

| Frequências Naturais (Hz) | | |
|---------------------------|-----------|-----------|
| | Sem Massa | Com Massa |
| 1 | 35,018 | 14,119 |
| 2 | 44,669 | 15,25 |
| 3 | 57,487 | 23,763 |
| 4 | 66,468 | 57,074 |
| 5 | 75,159 | 63,607 |
| 6 | 94,467 | 86,687 |

Pelos dados da Tabela 1, adquiridos pelo ANSYS, podemos notar a diferença nas frequências naturais da estrutura quando aplicada uma massa sobre a mesma. E tais resultados podem ser comprovados pela equação da frequência natural (1) para sistemas com um GDL, em que as frequências naturais de um sistema mecânico são inversamente proporcionais a sua massa, ou seja, quanto maior for massa, menor será os valores das frequências naturais do sistema.

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

W_n – Frequência natural; k – Rigidez; m – Massa

Pela análise também podemos notar que para cada frequência natural temos um modo de vibração específico. A seguir será ilustrado os seis modos de vibração escolhidos para a análise.

Para a representação dos modos de vibração e demais resultados, foi desenvolvido um modelo computacional com o objetivo de melhor representar a estrutura para a análise. No desenvolvimento de tal modelo foi a empregada técnica usual de discretização, via MEF, por meio do software ANSYS. Na solução computacional feita com o Ansys foram considerados dois elementos sólidos: o Solid186 hexaédrico de segunda ordem com malha Hex20 e Solid187 tetraédrico de segunda ordem com malha Tet10.

- **1º Modo de Vibração:** O primeiro modo de vibração é apresentado nas figuras 4.1 e 4.2. Nesse primeiro modo, o movimento da vibração ocorre ao longo do eixo X, da esquerda para a direita e vice-versa. Os maiores deslocamentos ocorrem no centro do sistema, na porção vermelha, onde se localiza o maquinário.

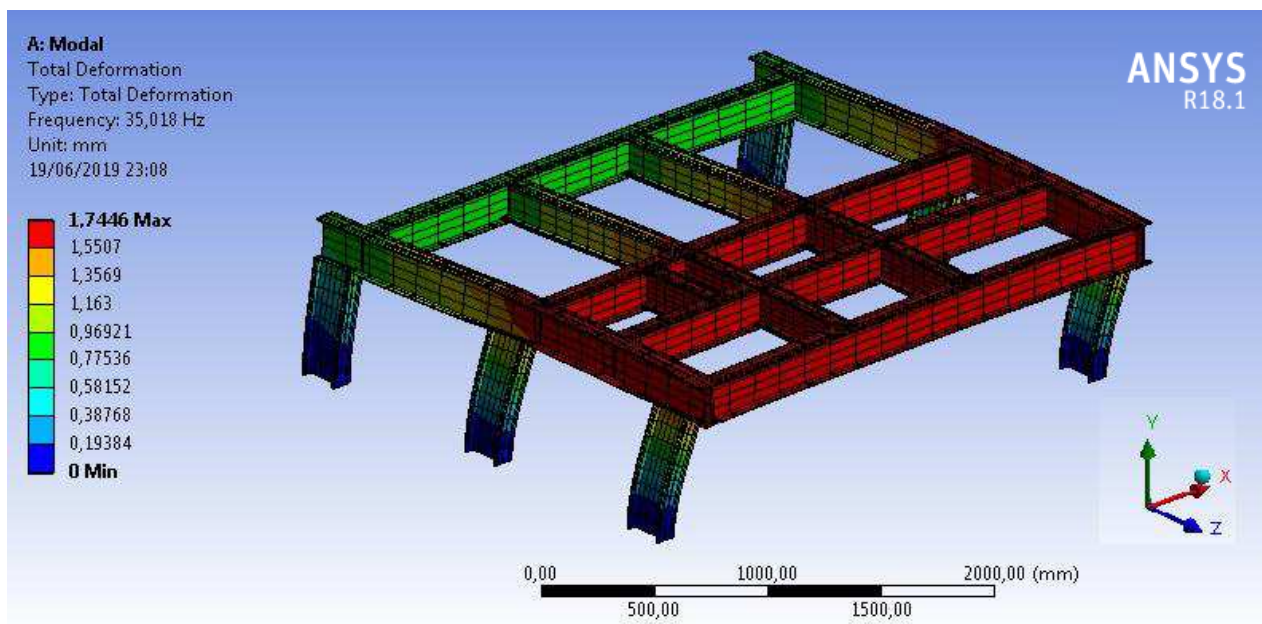


Figura 4.1 – 1º Modo de Vibrar sem aplicação da massa (Fonte: Autor).

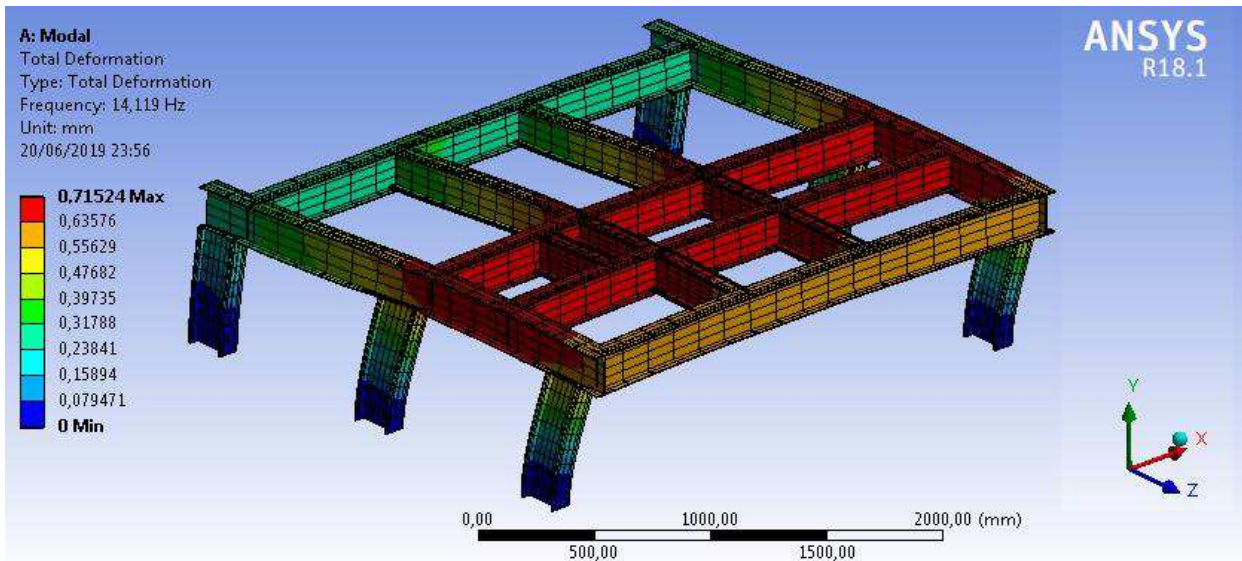


Figura 4.2 – 1º Modo de Vibrar com aplicação da massa (Fonte: Autor).

- **2º Modo de Vibração:** O movimento nesse modo ocorre ao longo do eixo Z, conforme ilustrado nas figuras 4.3 e 4.4. As maiores deformações observadas na estrutura, são representados em cor vermelha.

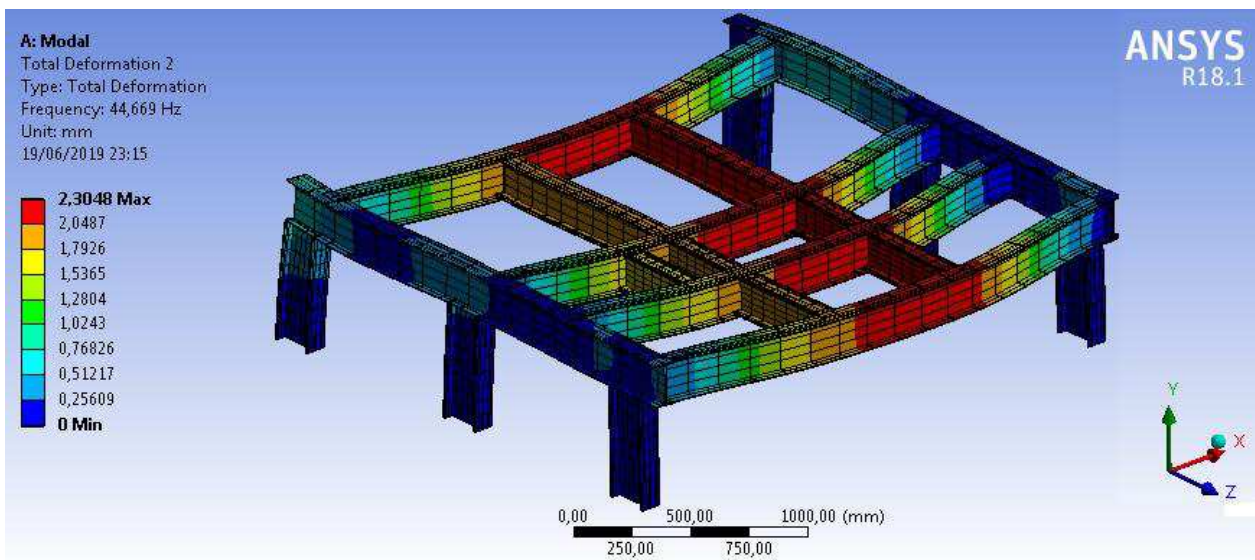


Figura 4.3 – 2º Modo de Vibrar sem aplicação da massa (Fonte: Autor).

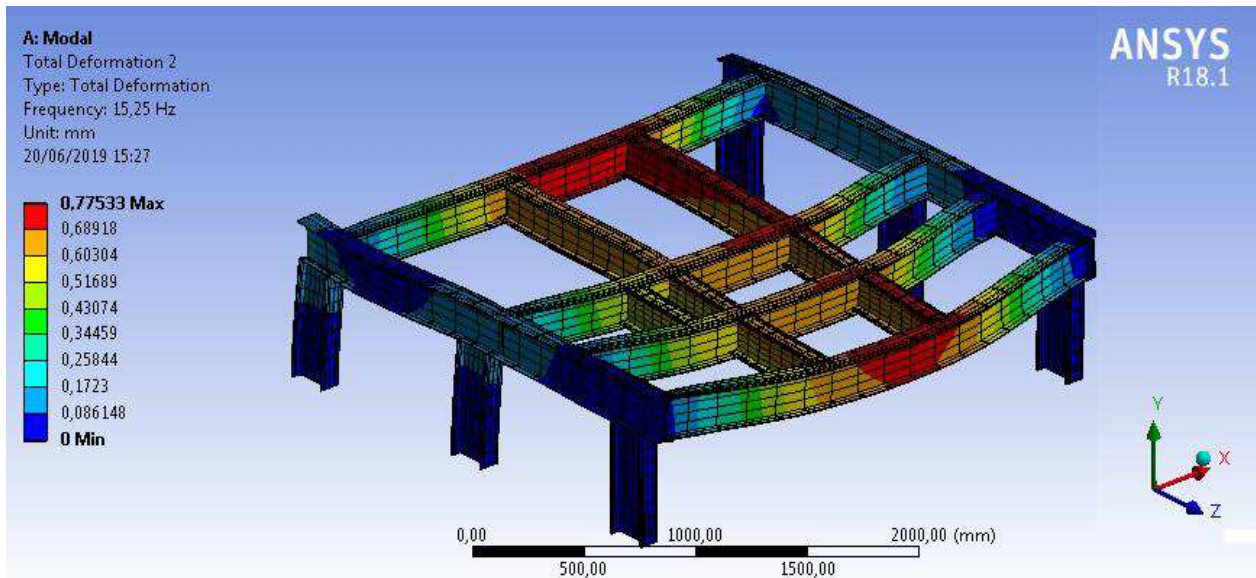


Figura 4.4– 2º Modo de Vibrar com aplicação da massa (Fonte: Autor).

- **3º Modo de Vibrar:** O terceiro modo de vibração é apresentado nas figuras 4.5 e 4.6. Neste modo, as deformações são mais intensas na parte posterior da estrutura, e o movimento ocorre ao longo do eixo X.

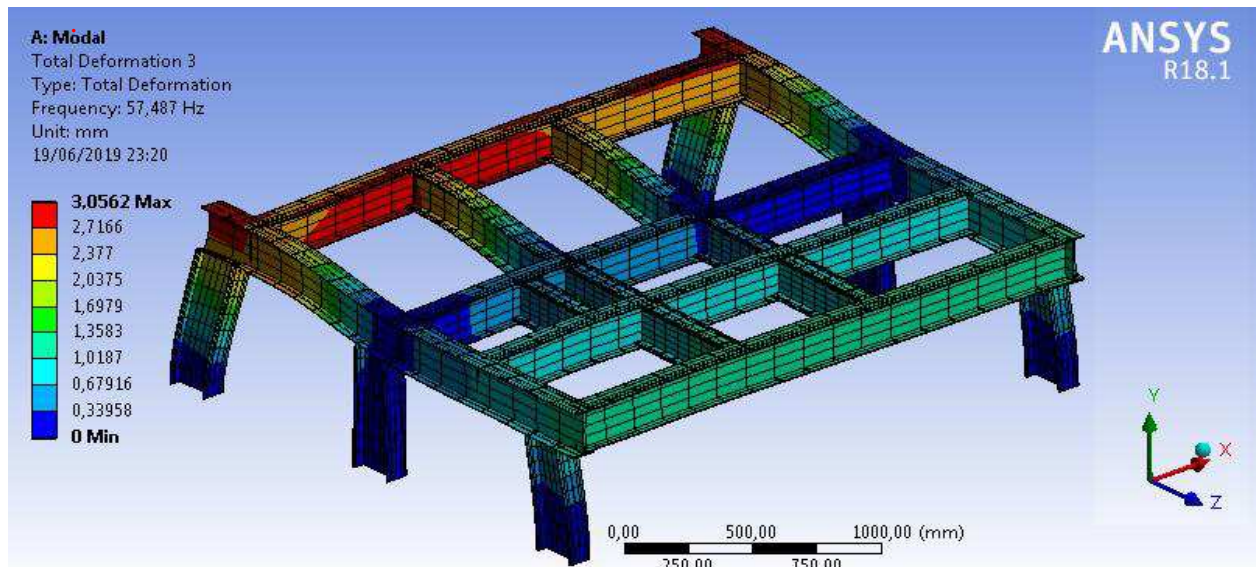


Figura 4.5 – 3º Modo de Vibrar sem aplicação da massa (Fonte: Autor).

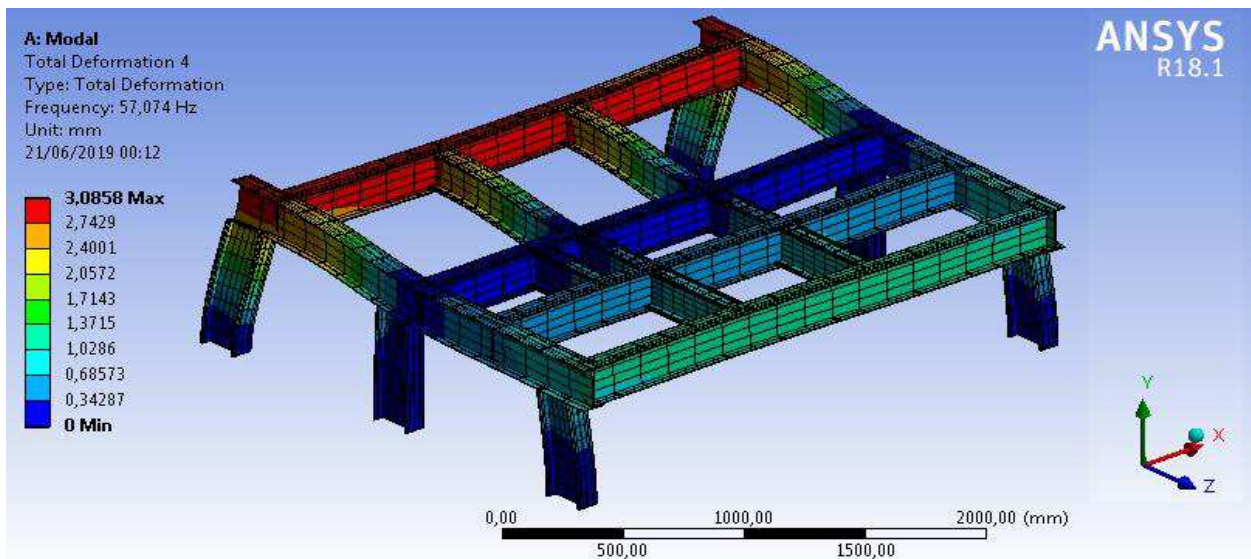


Figura 4.6 – 3º Modo de Vibrar com aplicação da massa (Fonte: Autor).

- **4º Modo de Vibrar:** O quarto modo de vibração é apresentado nas figuras 4.7 e 4.8. O movimento nesse modo ocorre ao longo do eixo Y. As maiores deformações observadas na estrutura, são representados em cor vermelha.

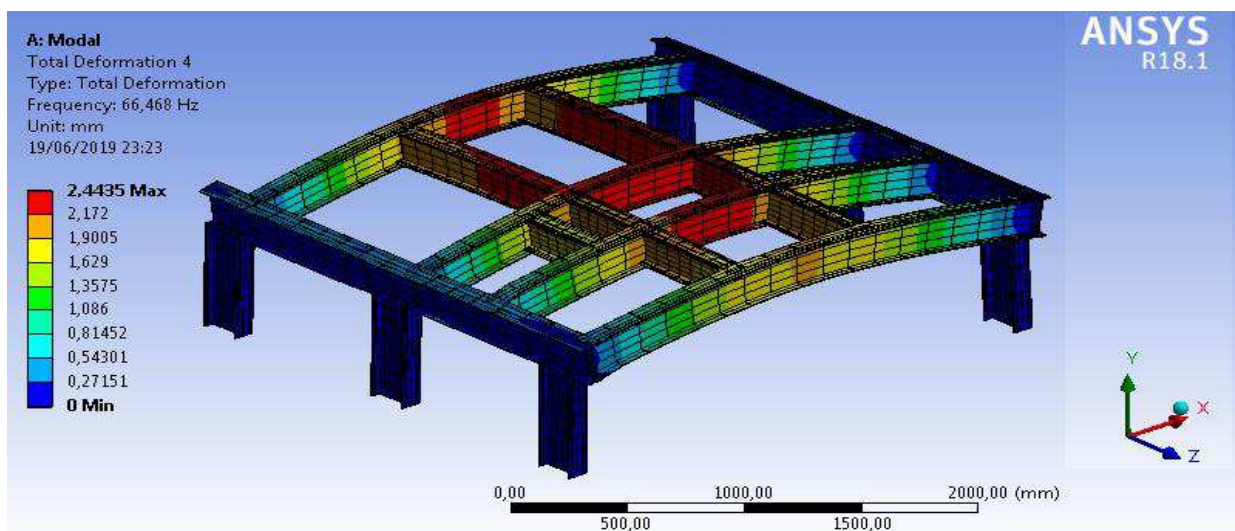


Figura 4.7 – 4º Modo de Vibrar sem aplicação da massa (Fonte: Autor).

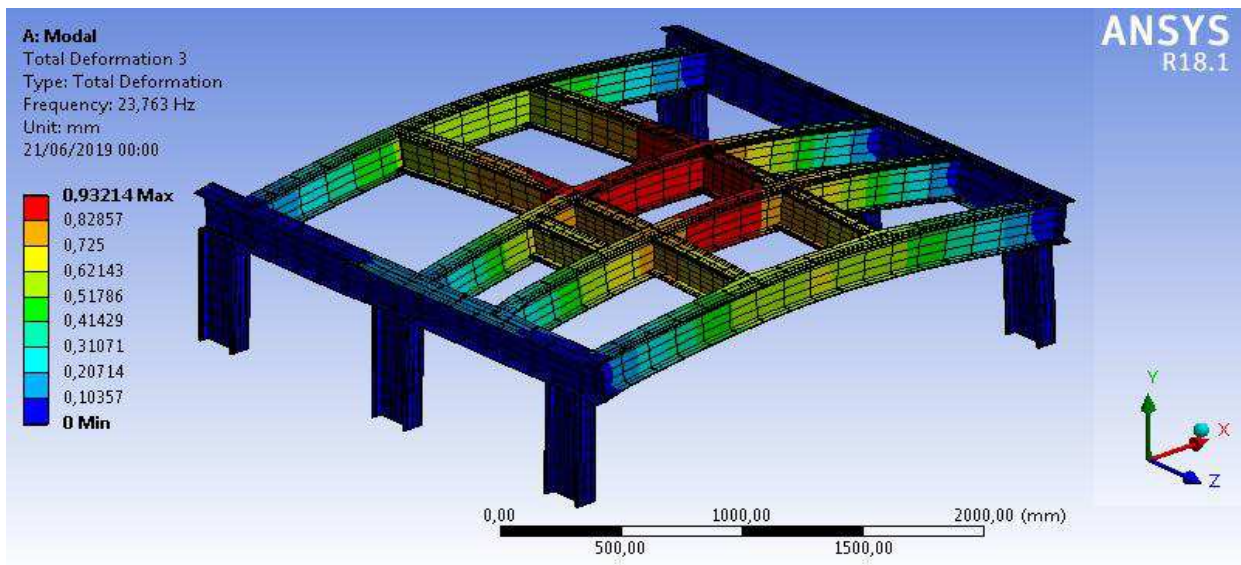


Figura 4.8 – 4º Modo de Vibrar com aplicação da massa (Fonte: Autor).

- **5º Modo de Vibrar:** O quinto modo de vibração é apresentado nas figuras 4.9 e 4.10. Neste modo de vibração, observa-se um movimento ondulatório em relação ao eixo Z.

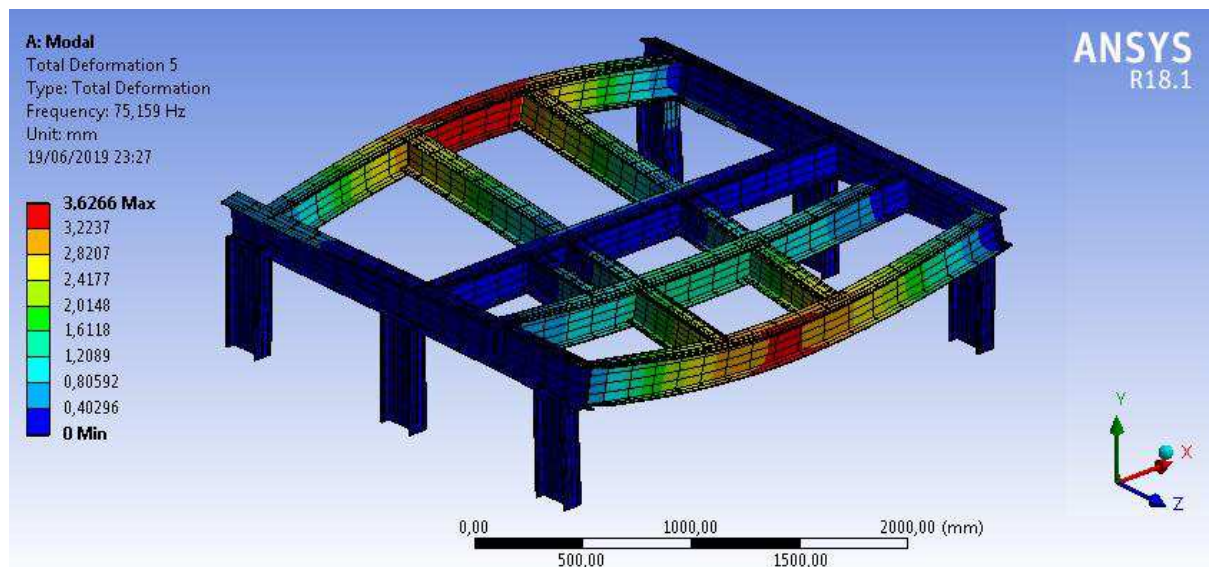


Figura 4.9 – 5º Modo de Vibrar sem aplicação da massa (Fonte: Autor).

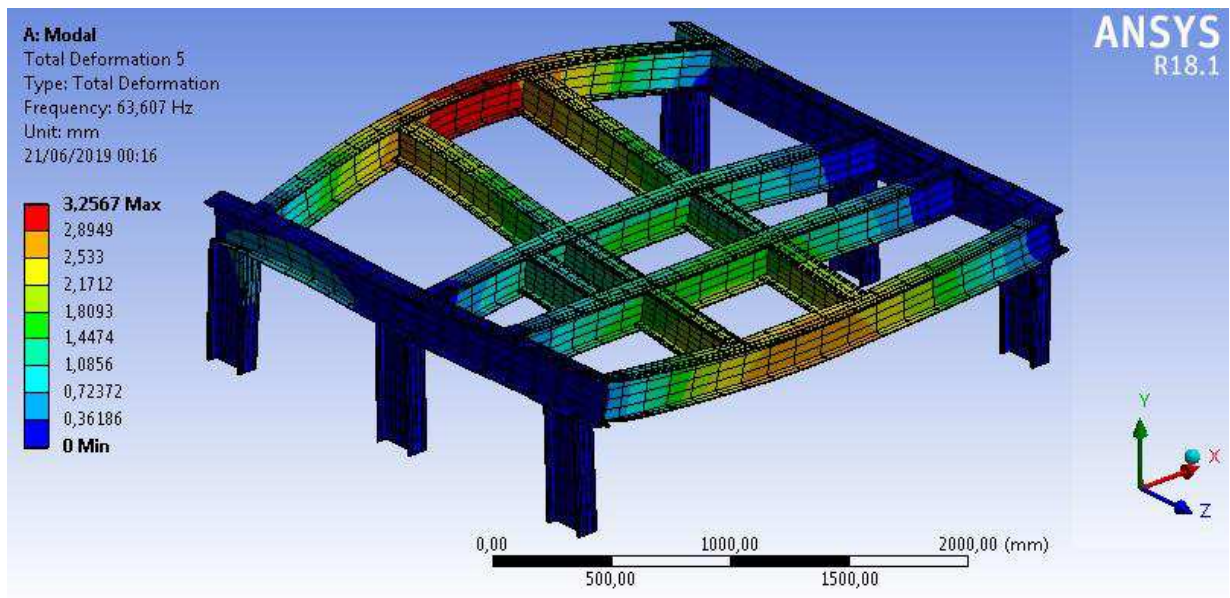


Figura 4.10 – 5º Modo de Vibrar com aplicação da massa (Fonte: Autor).

- **6º Modo de Vibrar:** O sexto modo de vibração ocorre conforme ilustrado nas figuras 4.11 e 4.12. Nesse modo, a uma movimentação em torno do eixo X e Z, de forma alternada, conforme ilustrado nas figuras.

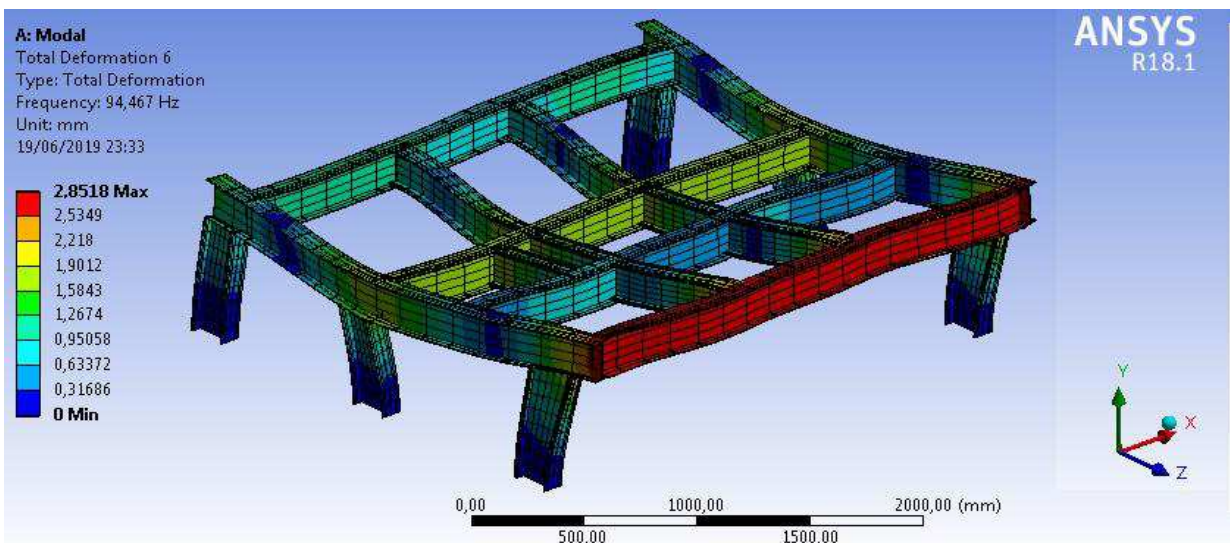


Figura 4.11 – 6º Modo de Vibrar sem aplicação da massa (Fonte: Autor).

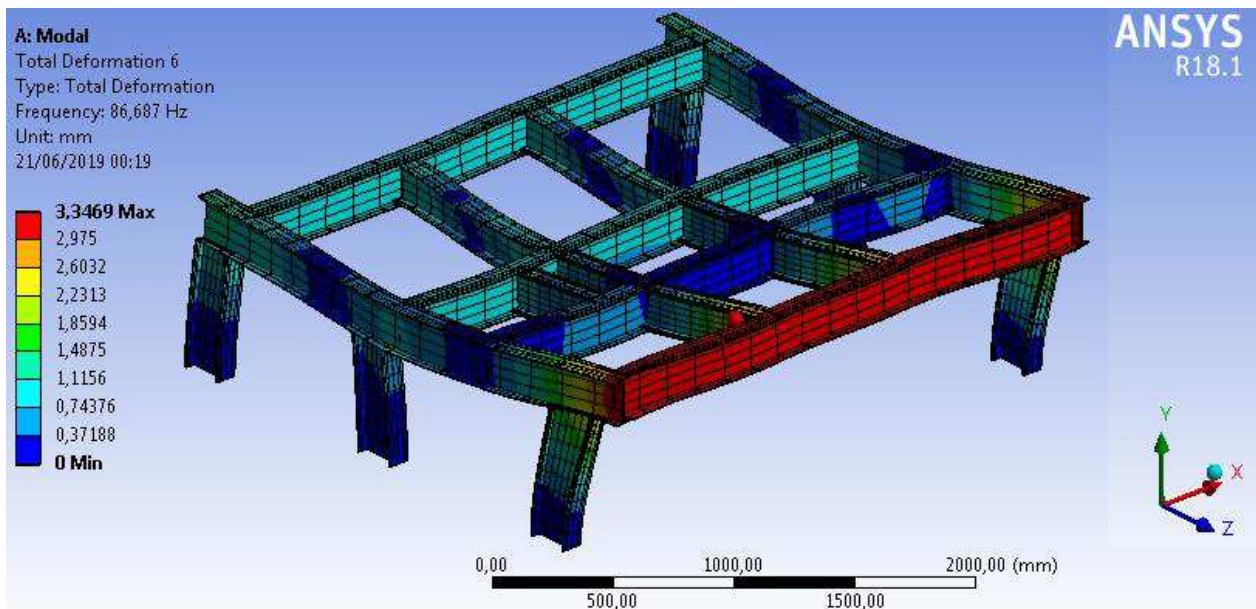


Figura 4.12 – 6º Modo de Vibrar com aplicação da massa (Fonte: Autor).

4.2 ANÁLISE DA VIBRAÇÃO NA ESTRUTURA

A estrutura está sujeita a diversos fatores que podem provocar vibração. No seu projeto inicial a ação do motor junto ao redutor de velocidade e a ação do moinho de ração, são as causas principais dessas vibrações, porém, pode-se notar possíveis vibrações decorrentes do desalinhamento de eixos do motor e do redutor, além de outras vibrações provenientes dos elementos de máquinas presentes no sistema mecânico sobre a estrutura. Por este motivo, é notório encontrar as várias frequências colhidas pelo VibSensor nos pontos de medição escolhidos durante a aquisição dos dados para análise.

Podemos observar pela Figura 3.16, que a frequência de 20 Hz é comum em cinco dos pontos de medição. E esta frequência necessita de um cuidado especial, já que os resultados da Tabela 2, obtidos pela análise modal, apresentam frequências próximas a mesma, e tal proximidade pode se

tornar mais “estreita” caso ocorra uma mudança de massa aplicada a estrutura.

Com uma proximidade de tais frequências, a coincidência pode ser mais provável, e caso isso aconteça, o fenômeno da ressonância será inevitável, proporcionando assim uma amplificação mecânica na estrutura, e com isto possíveis falhas, e na pior das hipóteses seu colapso e consideráveis prejuízos para toda a fábrica.

Tabela 2 – Frequências naturais próximas a frequência presente na estrutura (Fonte: Autor).

| Frequências Naturais (Hz) da Estrutura | |
|---|--------|
| <i>Com aplicação da massa</i> | |
| 1 | 14,119 |
| 2 | 15,25 |
| 3 | 23,743 |

Diante as frequências naturais e dos modos de vibração, obtidas pela análise modal do tópico 4.1, pode-se definir os modos 1 e 4 como predominantes na estrutura. Os demais modos não são levados em consideração, pois trabalham em frequências superiores às do aplicativo VibSensor, dificultando assim a análise, além de não ser possível ver uma estimulação para os demais modos.

O primeiro modo de vibração apresenta um comportamento vibracional que segue a ação do motor e do redutor de velocidade, ou seja, ele vibra no sentido do eixo X, como ilustrado nas figuras 4.1 e 4.2.

E o quarto modo de vibrar, apresenta um comportamento vibracional que segue a ação do moinho, isto é, no sentido do eixo Y. O moinho de ração recebe a ração, como mostra a Figura 4.13, e trabalha no sentido contínuo de cima para baixo e vice-versa, com o intuito de “esmagar” a ração, até torna-la uma parte em óleo, que posteriormente será reutilizada no processo de mistura da ração, e outra parte em farelo que também será reutilizado para os devidos fins no processo fabril.



Figura 4.13 – Entrada da ração e saída do óleo contido no moinho (Fonte: Autor).

5 CONCLUSÕES

Através da revisão literária, tendo como base os fundamentos das vibrações mecânicas, pode-se observar a importância de se realizar a análise modal em estruturas industriais para o melhor conhecimento de suas propriedades vibracionais em decorrência dos efeitos das fontes de vibração presentes nas fábricas.

Com o desenvolvimento do trabalho, é possível observar que uma estrutura metálica industrial pode apresentar várias frequências naturais, mas isto não implica um problema ou alguma falha. Porém, quando esta estrutura é exposta a níveis de vibrações excessivas, provenientes de uma máquina ou uma fonte de excitação qualquer, é preciso tomar as devidas precauções para que não haja uma coincidência de uma frequência natural da fonte de excitação com uma frequência da estrutura, pois caso isso ocorra, haverá uma amplificação mecânica na estrutura, conhecida por ressonância, que provocará graves prejuízos para a fábrica e para o equipamento.

Na comparação dos resultados obtidos na análise, verificou-se que a frequência natural da estrutura está diretamente ligada as condições de contorno e a sua massa. Na análise, quando adicionada a massa de 2.000 Kg (massa que foi prevista no projeto inicial de dimensionamento da estrutura), houve uma grande mudança nas frequências naturais da estrutura, porém não alterou os seus modos de vibrar. Mostrando assim a influência que a massa tem em relação à frequência natural.

A finalização do trabalho permite concluir que a análise modal em estruturas industriais é de suma importância para o cálculo e dimensionamento de estruturas, devendo ser aplicado em projetos futuros, visando a qualidade e segurança das fábricas.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Compreendendo a importância da análise modal e os efeitos das vibrações mecânicas nas estruturas industriais, sugere-se como futuros trabalhos:

- A aquisição de dados por meio de medidores de vibração mais específicos para o alcance de frequências maiores e assim melhores análises.
- Procedimentos para controle de vibrações em estruturas, por exemplo, uso de isoladores de vibrações para reduzir a transmissão das forças de excitação.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, MÁRCIO T. **VIBRAÇÕES MECÂNICAS: PARA ENGENHEIROS**. 2ªEd. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 1990.

ALVÁRO, F.M. AZEVEDO. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**, 1ªEd. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Portugal, 2003.

ALVES FILHO, A. **ELEMENTOS FINITOS: A base da tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7497**: Vibrações mecânicas e choques. Rio de Janeiro, 1981. 35p.

AU- KIU, SIU., **OPERATION MODAL ANALYSIS**. Springer Singapore.2017

AZEVEDO, Domingos. F. **ANÁLISE ESTRUTURAL COM ANSYS WORKBENCH**: Mogi das Cruzes: Domingos Flávio de Oliveira Azevedo, 2016.

BRUEL & KJAER, **STRUCTURE TESTING, Part II: Modal Analysis and Simulation**: *Ole Dossing*, Brüel&Kjær, March 1988.

FERRAZ, **FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DE RAÇÃO EXTRUSADA**. Disponível em: <https://www.ferrazmaquinas.com.br/conteudo/fluxograma-de-producao-de-racao-fareladaextrusada.html>. Acesso em: 01 de Maio de 2019.

HE, Jimin / Fu, Zhi-Fang, **MODAL ANALYSIS**. 1ª Ed. Butterworth-Heinemann, 2001.

INMAN, D. J., **ENGINEERING VIBRATION**, 3th ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2001.

MONCHY, FRANCOIS. **A FUNÇÃO DA MANUTENÇÃO**. São Paulo: Durban Ltda. 1987.

NOW, **VIBSENSOR USER GUIDE**. Disponível em: <http://www.now-instruments.com/get-help/5-vibsensor-user-guide>. Acesso em: 02 de Maio de 2019.

PAVLOU, Dimitrios g. **ESSENTIALS OF THE FINITE ELEMENTE METHOD**, For Mechanical and Structural engineers. 1ª Ed. Academic Press. 2015.

"Ressonância" em *Só Física*. Virtuoso Tecnologia da Informação, 2008-2019. Consultado em 03/05/2019 às 17:11. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/ressonancia.php>

RAO, SINGIREU. **VIBRAÇÕES MECÂNICAS**. 4ª EDIÇÃO. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, A. R. D. **SISTEMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE AVANÇADA ESTÁTICA E DINÂMICA DE ESTRUTURAS METÁLICAS**. 2009. 322 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Ouro Preto-MG, 2009.

SOEIRO, Newton Sure **CURSO DE FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÕES E BALANCEAMENTO DE ROTORES**, Belém: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2008.

SORIANO, HUMBERTO LIMA / Silvio de Souza, **ANÁLISE DE ESTRUTURAS, Método das Forças e Método dos Deslocamentos**, 2º Ed. Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2006.

SUSSEKIND, José Carlos **CURSO DE ANÁLISE ESTRUTURAL**, Vol. 1, 6ª Ed. Editora Globo, Porto Alegre-Rio de Janeiro, 1981.