



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS**



ALINE ANDRADE DA COSTA

**Modelagem e análise modal da estrutura de uma
impressora 3D utilizando o Método dos Elementos Finitos**

Limeira
2017



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS**



ALINE ANDRADE DA COSTA

Modelagem e análise modal da estrutura de uma impressora 3D utilizando o Método dos Elementos Finitos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Manufatura à Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Hideo Izuka

Limeira
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
Renata Eleuterio da Silva - CRB 8/9281

C823m Costa, Aline Andrade, 1995-
Modelagem e análise modal da estrutura de uma impressora 3D utilizando o método dos elementos finitos / Aline Andrade da Costa. – Limeira, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Jaime Hideo Izuka.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Impressão tridimensional. 2. Método dos elementos finitos. 3. Modelos numéricos. I. Izuka, Jaime Hideo, 1974-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Modeling and modal analysis of the structure of a 3D printer using the finite element method

Palavras-chave em inglês:

Three-dimensional printing

Finite element method

Numerical models

Área de concentração: Tecnologia

Titulação: Bacharel em Engenharia de Manufatura

Banca examinadora:

Daniel Iwao Suyama

Data de entrega do trabalho definitivo: 24-11-2017

Dedico este trabalho aos meus *pais* que foram a minha maior motivação e incentivadores durante a realização deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente aos meus *pais* por sempre me apoiarem em minhas escolhas e estarem sempre presentes dando todo suporte necessário.

Agradeço ao professor *Jaime Izuka* por me orientar durante este projeto, e por sempre estar presente participando ativamente durante todo trabalho.

E, agradeço ao *CNPQ* pela concessão de bolsa auxílio à Iniciação Científica, que foi muito importante durante a minha participação e permanência na execução da pesquisa durante a primeira etapa do projeto.

ANDRADE DA COSTA, Aline. Modelagem e Análise Modal da Estrutura de uma impressora 3D utilizando o Método dos Elementos Finitos. 2017. n.ºf. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Manufatura.) – Faculdade de Ciências Aplicadas. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2017.

RESUMO

As impressoras 3D estão conquistando cada vez mais seu espaço no mercado tecnológico. O processo de impressão 3D pode ser utilizado para as mais variadas finalidades, sendo que as principais vantagens associadas são a rapidez e o baixo custo de fabricação dos protótipos. A importância destas máquinas desperta o interesse na área de Engenharia de Manufatura, seja no desenvolvimento de novas configurações/projetos de impressoras quanto no processo de deposição de material. Em ambas as áreas, é imprescindível conhecer o comportamento dinâmico da estrutura durante a operação. Por exemplo, uma combinação de movimentos poderia excitar a impressora 3D em alguma frequência natural, acarretando em um acabamento ruim ou até mesmo um dano à estrutura. A solução de torná-la muito rígida pode não ser viável quando buscamos uma disseminação deste processo através de máquinas com menor custo, uma vez que adicionar maior rigidez sem seguir um critério de engenharia geralmente acarreta maiores custos devido a utilização de muito material. O primeiro passo para resolver estes problemas está em conhecer o comportamento modal da estrutura, ou seja, conhecer os modos de vibrar e as respectivas frequências naturais. Estas características podem ser obtidas através de uma simulação numérica utilizando, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos. A grande vantagem de se utilizar um modelo matemático está na possibilidade de se alterar a geometria e verificar os resultados de forma rápida, quando comparado ao processo tradicional de se construir e testar um protótipo físico. Mas para que a simulação tenha resultados confiáveis, é preciso validar o modelo numérico, ou seja, verificar os seus parâmetros de massa e rigidez com um modelo real. Esta validação foi feita através da análise modal. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo numérico, validado experimentalmente, que representasse a estrutura de uma impressora 3D do Laboratório de Prototipagem Automação e Simulação (LAPS) da FCA Unicamp. Para isso, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de encontrar as frequências naturais e os modos de vibrar da estrutura.

Palavras-chave: Impressora, MEF, frequências.

ANDRADE DA COSTA, Aline. Modeling and Modal Analysis of the Structure of a 3D Printer using the Finite Element Method. 2017. nºf. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Manufatura.) – Faculdade de Ciências Aplicadas. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2017.

ABSTRACT

3D printers are gaining more and more space in the technology market. The 3D printing process can be used for a wide range of purposes, with the main advantages associated with the rapidity and low cost of manufacturing the prototypes. The importance of these machines arouses interest in the area of Manufacturing Engineering, whether in the development of new configurations / projects of printers or in the process of deposition of material. In both areas, it is imperative to know the dynamic behavior of the structure during operation. For example, a combination of motions could excite the 3D printer at some natural frequency, resulting in poor finish or even damage to the frame. The solution of making it very rigid may not be feasible when we seek to spread this process through machines with lower cost, since adding more rigidity without following an engineering criterion usually entails higher costs due to the use of a lot of material. The first step to solve these problems is to know the modal behavior of the structure, that is, to know the modes of vibration and the respective natural frequencies. These characteristics can be obtained by numerical simulation using, for example, the Finite Element Method. The great advantage of using a mathematical model is the possibility of changing the geometry and verifying the results quickly when compared to the traditional process of constructing and testing a physical prototype. But for the simulation to have reliable results, it is necessary to validate the numerical model, that is, to verify its parameters of mass and rigidity with a real model. This validation was done through modal analysis. The objective of this work was the development of a numerical model, experimentally validated, that represented the structure of a 3D printer of the Laboratory of Prototyping Automation and Simulation (LAPS) of FCA Unicamp. For this, the Finite Element Method (MEF) was used to find the natural frequencies and vibration modes of the structure.

Keywords: Printer, MEF, frequencies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Modelo CAD da impressora 3D.....	19
Figura 2(a)	Análise da Caixa Externa.....	19
Figura 2(b)	Análise da Estrutura Interna.....	19
Figura 3	Desenho esquemático da estrutura com as coordenadas utilizadas no código computacional.....	21
Figura 4	Modelo CAD atualizado da impressora 3D.....	22
Figura 5(a)	Dimensões da Estrutura de Ferro.....	22
Figura 5(b)	Dimensões da Caixa Externa.....	22
Figura 6	Análise da Deformação Total das Configurações 4, 5 e 6, respectivamente.....	23
Figura 7	Análise dos modos de vibrar 1, 2, 3 e 4, respectivamente.....	24
Figura 8	Análise dos modos de vibrar 5, 6, 7 e 8, respectivamente.....	24
Figura 9	Análise dos modos de vibrar 9, 10, 11 e 12, respectivamente.....	25
Figura 10	Análise dos modos de vibrar 13, 14, 15 e 16, respectivamente.....	25
Figura 11	Análise dos modos de vibrar 17, 18, 19 e 20, respectivamente.....	26
Figura 12(a)	Estrutura Final.....	28

Figura 12(b)	Pesagem.....	28
Figura 13	Modelo Numérico Estrutura Interna Final.....	29
Figura 14	Estrutura da Viga e Chapa.....	32
Figura 15	Análise dos modos de vibra 1, 2, 3 e 4, respectivamente, da Viga.....	33
Figura 16	Análise dos modos de vibra 5, 6, 7 e 8, respectivamente, da Viga.....	33
Figura 17	Análise dos modos de vibra 9 e 10, respectivamente, da Viga.....	33
Figura 18	Análise da Viga No OpenModal.....	34
Figura 19	Análise dos modos de vibrar 1, 2 e 3, respectivamente, da Viga no OpenModal.....	35
Figura 20	Análise dos modos de vibrar 1, 2, 3 e 4, respectivamente, da Chapa.....	36
Figura 21	Análise dos modos de vibrar 5, 6, 7 e 8, respectivamente, da Chapa.....	36
Figura 22	Análise dos modos de vibrar 9, 10, 11 e 12, respectivamente, da Chapa.....	36
Figura 23	Análise dos modos de vibrar 13, 14, 15 e 16, respectivamente, da Chapa.....	37
Figura 24	Análise dos modos de vibrar 17, 18, 19 e 20, respectivamente, da Chapa.....	37
Figura 25	Análise da Chapa no OpenModal.....	37
Figura 26	Análise dos modos de vibrar 1, 2 e 3, respectivamente, da Chapa no OpenModal.....	38
Figura 27	Diagrama de Blocos.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Frequências Naturais da Caixa Externa de Acrílico obtidas no programa Ansys.....	20
Tabela 2	Frequências Naturais da Estrutura de Ferro Interna obtidas no programa Ansys.....	20
Tabela 3	Frequências Naturais da Estrutura de Ferro obtidas no Matlab.....	21
Tabela 4	Frequências Naturais da Estrutura de Ferro Atualizada obtidas no programa Ansys.....	23
Tabela 5	Frequências obtidas a partir do teste do martelo.....	26
Tabela 6	Frequências obtidas no teste FFT, sem a interferência do motor de passo.....	27
Tabela 7	Frequências da estrutura interna final obtida no Ansys.....	29
Tabela 8	Frequências da Viga obtidas no ANSYS.....	32
Tabela 9	Frequências da Viga obtidas no OpenModal.....	34
Tabela 10	Frequências da Chapa obtidas no ANSYS.....	35
Tabela 11	Frequências da Chapa obtidas no OpenModal.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
EF	Elementos Finitos
FCA	Faculdade de Ciências Aplicadas
FFT	Fast Fourier Transform
FRF	Funções de Resposta em Frequência
LAPS	Laboratório de Prototipagem Automação e Simulação
MEF	Método dos Elementos Finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

M Matriz de massa

K Matriz de rigidez

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Vibrações Mecânicas.....	15
2. MÉTODOS.....	16
2.1 Método dos Elementos Finitos.....	16
2.2 Auto Problema.....	17
2.3 Análise Experimental.....	18
3. RESULTADOS.....	18
3.1 Medições dimensionais e Modelo CAD.....	19
3.2 Modelagem numérica da estrutura através do MEF utilizando o programa ANSYS.....	19
3.3 Obtenção dos modos e frequências naturais do modelo numérico utilizando uma rotina Matlab.....	20
3.4 Atualizações do Modelo Numérico.....	22
3.5 Análise dos modos de vibrar.....	24
3.6 Análise Experimental.....	26
3.7 Desmontagem e Pesagem da estrutura.....	28
3.8 Modelo Numérico da Estrutura Final.....	29
3.9 Teste Modal.....	30
3.10 Software OpenModal.....	31
3.11 Testes Experimentais no OpenModal.....	32
3.11.1 Viga.....	32
3.11.2 Chapa.....	35
3.12 Diagrama de Blocos.....	39
3.13 Implementação Média Linear.....	41
4. CONCLUSÕES.....	41
5. REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

As impressoras 3D são máquinas de prototipagem rápida, desenvolvidas para criar produtos no menor tempo possível, se diferenciando das máquinas convencionais. No início desta nova tecnologia, as máquinas eram utilizadas apenas em indústrias, mas o processo se expandiu e o principal objetivo dos pesquisadores dessa área é adotar seu uso em escritórios e residências particulares. O desenvolvimento de protótipos por impressão 3D é semelhante às impressoras comuns, onde o cabeçote deposita a tinta sobre o papel, linha por linha. No sistema de impressão tridimensional o produto é desenvolvido graficamente em 3D no software computacional e em seguida o modelo é convertido em coordenadas, que são transferidos para a impressora em linguagem de máquina. O material de construção presente no cabeçote da impressora é depositado numa plataforma de acordo com o desenho final, formando o protótipo físico. O processo de impressão utiliza materiais plásticos, resinas, foto polímeros e alguns metais específicos dependendo da tecnologia empregada (VOLPATO, et al. 2007).

A primeira impressora 3D surgiu no final da década de 1980, idealizado por Chuck Hull, que utilizou a prototipagem rápida na criação de lâmpadas para solidificação de resinas. Uma das vantagens do processo de impressão 3D é a sua diversidade de aplicações em vários setores, não sendo limitado à criação de protótipos para atender a produção industrial, de forma que o sistema tem entrado também nas áreas sociais e acadêmicas. Com as recentes descobertas e o desenvolvimento de ferramentas avançadas, integrando à manufatura rápida, surgiram algumas aplicações até mesmo na aérea da medicina em próteses personalizadas, tomografia e anatomia do corpo humano. (RAULINO, 2011).

A impressão 3D está associada à redução do tempo de fabricação, por ser uma tecnologia relativamente rápida, já que o processo é executado em um único passo, e à redução de custo, uma vez que é possível obter protótipos ainda em fases iniciais de forma barata devido aos materiais empregados e evitando também prejuízos no caso de falhas. E ainda tem a capacidade de construir peças com geometrias complexas e difíceis para outros processos, maior precisão e qualidade em produtos finais, melhores resultados em testes e ensaios com prototipagem por impressão 3D (GARCIA, 2010).

1.1 Vibrações Mecânicas

As vibrações mecânicas surgem na presença de forças dinâmicas, que variam ao longo do tempo e atuam sobre elementos dos sistemas mecânicos ou partes da estrutura. A resposta à vibração, de um dado sistema, depende da intensidade dessas forças, do tipo de excitação e das características de inércia, rigidez e amortecimento. Por outro lado, a isolamento das vibrações pode ser realizada considerando-se medidas de prevenção na fase de projeto e de controle na fase de execução. Com relação às forças de excitação provocadas pelo ambiente, tais como; abalos sísmicos, carregamentos ocasionados pelo vento, ondas, ação de pessoas ou veículos sobre pontes, viadutos, passarelas, estruturas de prospecção ou ainda propulsores e equipamentos auxiliares podem ser calculadas assim que sejam escolhidos os vários componentes destes sistemas. A resposta dinâmica dependerá dos parâmetros vibracionais do sistema mecânico sobre o qual se realiza a análise. As frequências naturais de tais estruturas podem ser calculadas com precisão por meio de programas de computador, desenvolvidos para se obter respostas às deformações aos carregamentos e tensões associadas. Dentre eles, mais conhecido é o Método dos Elementos Finitos (RAIA, 2011).

Um modelo de medição é constituído de um número de nós que representam pontos na estrutura real, onde as medições são realizadas. A resolução dos modos de vibração é melhor do que muitos pontos são usados. Por outro lado, as medições são mais demoradas. Muitos pontos devem ser utilizados se os modos de vibração de alta ordem são de interesse. A colocação dos transdutores (pontos de medição) também é importante. Isto é mais fácil de detectar o movimento da estrutura, se os transdutores são colocados onde as amplitudes do movimento são elevadas. Por outro lado, onde há transdutores terá então maior influência sobre o comportamento da estrutura. A massa dos transdutores pode ter uma influência considerável para estruturas de luz ponderada. Se os transdutores são montados em pontos que têm nenhuma ou pequenas amplitudes do movimento da estrutura é difícil de medir. Para encontrar bons lugares para os transdutores é indicado simular a estrutura por um modelo de elementos finitos simples.

A análise modal experimental é uma interpretação dos dados de teste recolhidos no âmbito de um teste em uma estrutura vibrante. A finalidade de uma validação experimental é criar um modelo de propriedades de vibração e o

comportamento do teste estrutura. As propriedades de interesse são frequências de ressonância e modos de vibração da estrutura. As propriedades modais são estimadas a partir das funções de resposta em frequência (FRF) obtidas a partir dos dados de teste. No FRF um pico da magnitude marca cada frequência de ressonância. Cada frequência de ressonância pode ser associada com certo modo de vibração que representa a forma de deflexão a estrutura. Existem vários métodos disponíveis para a estimativa dos modos de vibração, tanto de graduação única e múltipla de métodos de liberdade. As técnicas de estimação, também chamados de métodos de ajuste de curvas, são usadas para gerar uma função analítica que se aproxima das FRF's medidos (MYREN e OLSSON, 1999).

2 MÉTODOS

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se na aplicação da análise modal de estruturas para a detecção de falhas. O trabalho iniciou-se com o estudo do problema de vibração e utilizou-se o MEF para definir os modelos numéricos. A partir dos modelos numéricos, as características modais da estrutura foram obtidas. Estes resultados foram comparados com resultados experimentais. A seguir, serão descritos brevemente os conceitos que envolvem o problema de vibração, MEF, o auto problema e a obtenção das características modais de forma experimental.

2.1 Método dos Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos é definido por Bittencourt, 2007, como sendo um método numérico para a solução de Problemas de Valor de Contorno envolvendo equações diferenciais ordinárias e parciais e respectivas condições de contorno. Os problemas físicos que utilizam este método de solução são variados, mas vamos nos limitar aos problemas de vibração. A ideia geral deste método é que conseguimos subdividir um domínio complicado em uma série de regiões menores onde a equação diferencial é solucionada de forma aproximada. Através da montagem deste conjunto de equações de cada região, determinamos o comportamento de todo o domínio. Cada região refere-se a um elemento e o processo de divisão do domínio em um número finito de elementos é chamado de discretização. Os elementos são conectados em pontos específicos, chamados de nós e o processo de montagem requer que a solicitação seja continua ao longo das bordas de elementos vizinhos.

Neste trabalho, a modelagem e simulação foram feitas no software comercial Ansys. A interface gráfica permite uma interação bastante amigável no processo de modelamento e geração de malha, conhecido como pré-processamento. Como resultado, temos definidas as matrizes de massa e rigidez. O cálculo para a obtenção dos modos e frequências naturais é feito na etapa de processamento, que basicamente resolve o auto problema como descrito no próximo tópico. A análise de resultados é feita na etapa de pós-processamento, que também é feita de forma interativa.

2.2 Auto Problema

O modelo de EF definido na etapa de pré-processamento é descrito através das matrizes de massa global M e matriz de rigidez global K . A transformação de coordenadas do espaço nodal para o espaço modal é feita através dos autovetores obtidos através da solução do auto problema ou problema do autovalor. Para o modelo descrito através das matrizes de massa M e rigidez K , o auto problema pode ser expresso por (CLOGH e PENZIEN, 2003).

$$[K - \omega^2 M] = 0 \quad (1)$$

Outra forma de representar este problema é obtida pré-multiplicando a equação (1) pela inversa da matriz de massa, obtendo a forma.

$$[M^{-1}K - \omega^2 I] \phi = 0 \quad (2)$$

A solução não trivial é obtida somente se a matriz é singular ou:

$$\det [M^{-1}K - \omega^2 I] = 0 \quad (3)$$

A solução do auto problema é o conjunto dos N autovalores, onde N é o número de graus de liberdade. Estes autovalores têm um significado físico bem definido, eles contêm o (quadrado) da frequência angular associado com as massas individuais. Substituindo os autovalores na Equação (3), obtemos o conjunto de amplitudes denominados autovetores. Cada autovalor tem um autovetor associado. Os autovetores expressam as formas de cada modo, ou em outras palavras, a forma geométrica de vibração para uma dada frequência de ressonância. As amplitudes dos autovetores não são expressas em coordenadas físicas e seus valores são normalizados, por exemplo, com relação ao grau de liberdade de maior amplitude.

A notação matricial é uma forma conveniente para prosseguirmos com o texto. Assim, a matriz dos autovalores (frequências naturais) é definida como:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

E a matriz dos autovetores, ou matriz modal que contem os N autovetores da estrutura é definida como:

$$\Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{21} & \dots & \phi_{n1} \\ \phi_{12} & \phi_{22} & \dots & \phi_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{1n_d} & \phi_{2n_d} & \dots & \phi_{nn_d} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde é o j-ésimo deslocamento do i-ésimo modo.

2.3 Análise Experimental

Os parâmetros dinâmicos de um sistema mecânico obtidos de forma experimental são de grande importância no processo de validação de um modelo numérico que se utiliza do MEF. O modelo MEF define o modelo dinâmico capaz de calcular e caracterizar a resposta do sistema a uma entrada conhecida. A validação deste modelo teórico é feito através da verificação prática de sua característica fundamental, descrita pelas frequências naturais. Métodos baseados na ressonância de uma estrutura são chamados de técnicas de análise modal ou teste de ressonância (INNMAN, 2006). Os modos de vibrar com as correspondentes frequências naturais representam uma propriedade de um sistema, e eles são únicos para um dado sistema (MEIROVITCH, 1986). Assim como a estrutura física, o auto problema definido pelas matrizes de massa e rigidez do modelo teórico determinam os autovetores e autovalores que correspondem aos modos e frequências naturais do sistema físico. A validação do modelo MEF será feito através da verificação dos seus modos e frequências com o teste modal experimental.

3 RESULTADOS

3.1 Medições dimensionais e Modelo CAD

A partir da medição dimensional de toda a estrutura que compõem a impressora 3D: estrutura de aço interna e caixa de acrílico externa, o modelo CAD foi gerado no programa SolidWorks, mantendo todas dimensões reais do modelo e conferindo a cada estrutura o seu material correspondente. Em seguida, o desenho CAD apresentado na Figura 1 foi importado ao ANSYS para simulações.

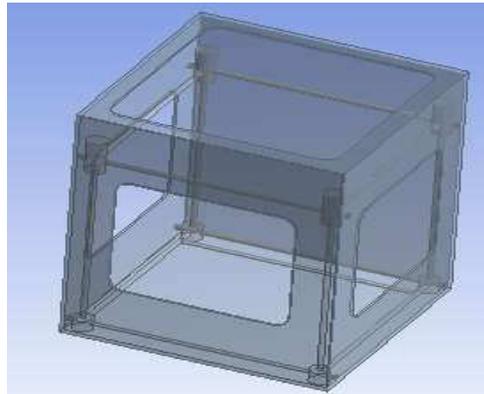


Figura 1. Modelo CAD da impressora 3D.

3.2 Modelagem numérica da estrutura através do MEF utilizando o programa ANSYS

A partir do modelo CAD foi possível gerar a malha de MEF no software ANSYS. Considerando a situação livre-livre, calcula-se o comportamento modal da estrutura. A caixa de acrílico externa está representada pela figura 2(a) e a estrutura de ferro interna é apresentada na figura 2(b). O MEF apresenta a vantagem de se aplicar em geometrias complexas, com grandes deslocamentos e diversos tipos de materiais e carregamentos, porém, a solução obtida é aproximada, dependente da malha utilizada. A malha subdivide a estrutura em diversas regiões menores para a resolução numérica da equação diferencial, este processo é denominado discretização.

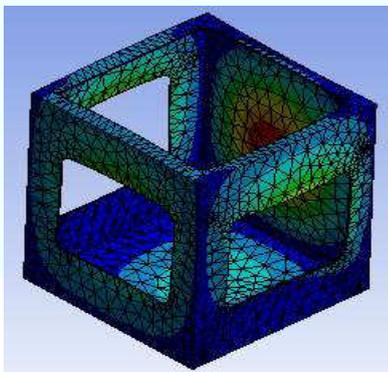


Figura 2(a). Análise da Caixa Externa.

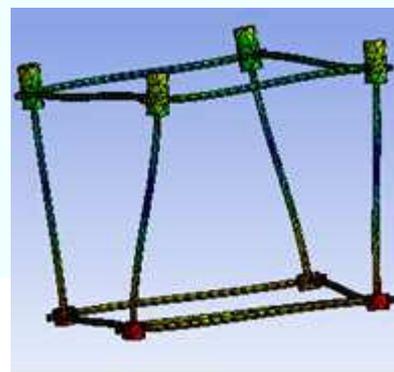


Figura 2(b). Análise da Estrutura Interna.

Durante o processamento que soluciona o auto problema, obtém-se os modos e frequências naturais, que estão descritos na Tabela 1 e Tabela 2. Os seis primeiros valores das frequências foram descartados por se aproximar de zero, devido à vibração livre associada ao movimento de corpo rígido.

Tabela 1. Frequências Naturais da Caixa Externa de Acrílico obtidas no programa Ansys.

Modo	Frequência (Hz)
1	41,2
2	45,4
3	48,7
4	56,7
5	66,7
6	73,2
7	81,5
8	83,6
9	90,1
10	100,6
11	106,5
12	107,4
13	116,4
14	128,1
15	135,3
16	141,2
17	146,5
18	161
19	162,7
20	169,9

Tabela 2. Frequências Naturais da Estrutura de Ferro Interna obtidas no programa Ansys.

Modo	Frequência (Hz)
1	35,1
2	41,6
3	44,7
4	44,7
5	46,9
6	69,7
7	118,3
8	122,5
9	124,8
10	139,9
11	143,5
12	169,5
13	194,3
14	200,7
15	206,1
16	208,8
17	224,4
18	224,6
19	227,6
20	228,4

3.3 Obtenção dos modos e frequências naturais do modelo numérico utilizando uma rotina Matlab

O código computacional implementado em Matlab determina as matrizes de massa e rigidez globais. As informações das coordenadas de cada nó que define os elementos de viga são apresentados na Figura 3. A partir destas coordenadas, podemos encontrar as matrizes de transformação de coordenadas que, combinadas com as matrizes locais de massa e rigidez, possibilitam definir as respectivas matrizes globais (FERREIRA, 2009).

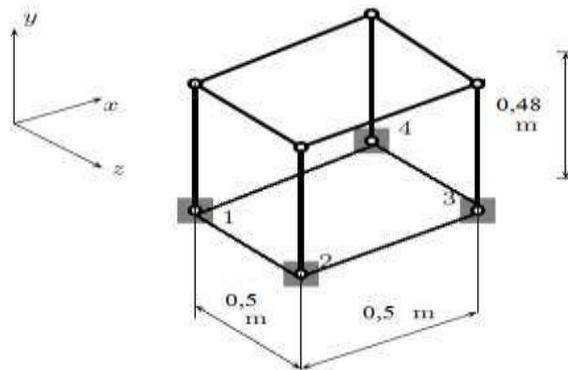


Figura 3. Desenho esquemático da estrutura com as coordenadas utilizadas no código computacional.

A resolução do problema de vibração fornece os autovalores, que correspondem às frequências naturais e os autovetores, que estão associados aos modos de vibração de um elemento ou sistema estrutural qualquer. Utilizamos a função “eig(Ks,Ms)” implementada no Matlab para encontrar os valores das frequências naturais do sistema. Os resultados estão dispostos na Tabela 3. Verifica-se que os valores encontrados são similares aos resultados obtidos a partir do programa ANSYS, possibilitando a validação do modelo numérico correspondente à estrutura de ferro (KWON, 1997).

A precisão dos resultados obtidos pelo MEF depende da forma, quantidade dos elementos finitos e tipo da função de interpolação. As regiões com variações bruscas do fenômeno exigem maior refinamento da malha a ser usada, a eficiência da distribuição da malha produzirá uma análise eficiente. Verifica-se que a partir da malha gerada no programa ANSYS é possível gerar um perfil da viga fiel à estrutura real e refinando a malha é possível caracterizar de forma mais precisa, para obtenção de resultados confiáveis.

Tabela 3. Frequências Naturais da Estrutura de Ferro obtidas no Matlab.

Modo	Frequência (Hz)
1	40,2
2	42,8
3	56,3
4	57,9
5	58,7
6	58,7
7	108,6
8	113
9	113
10	129,1
11	133,2
12	133,2
13	202,9
14	202,9
15	207,5
16	207,5
17	215
18	215
19	222,6
20	222,6

3.4 Atualizações do Modelo Numérico

Com o início da segunda etapa da pesquisa, surgiu a necessidade de atualizar o modelo numérico para que os resultados se tornassem mais próximos do modelo real da impressora. A figura 4 apresenta o modelo CAD atualizado, os componentes em destaque referem-se às modificações.

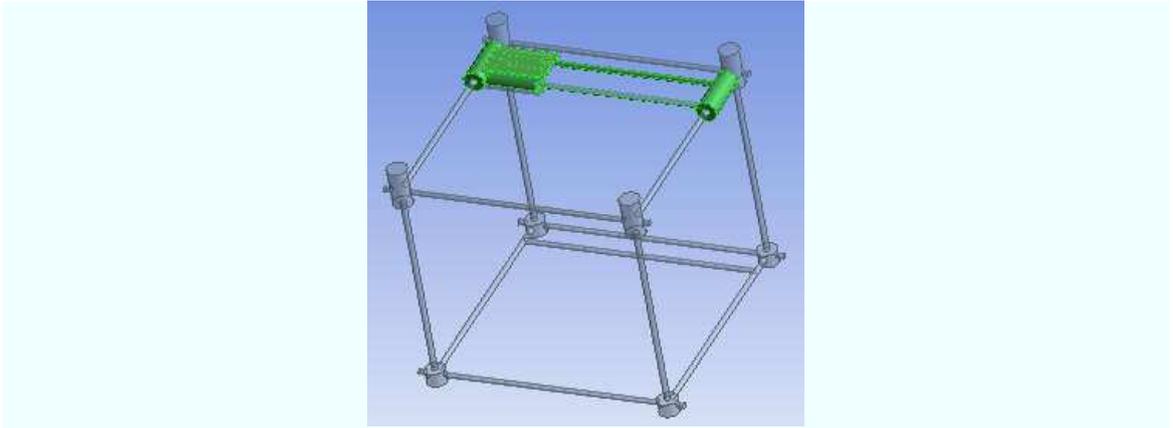


Figura 4. Modelo CAD atualizado da impressora 3D.

A Figura 5(a) apresenta as dimensões da estrutura de ferro interna após as atualizações. E, a Figura 5(b) ilustra as dimensões da caixa de acrílico externa, as medidas estão em milímetros.

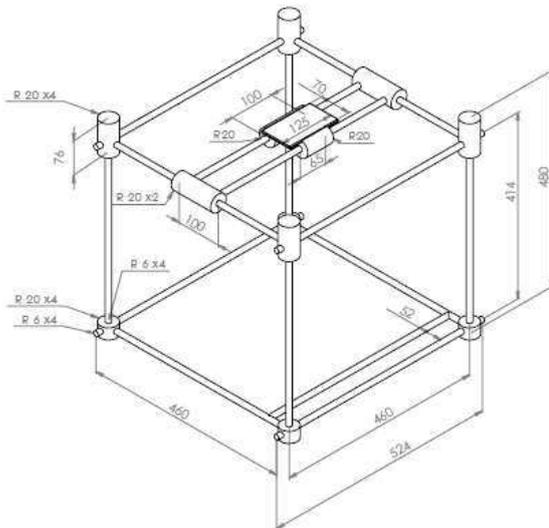


Figura 5(a). Dimensões da Estrutura de Ferro.

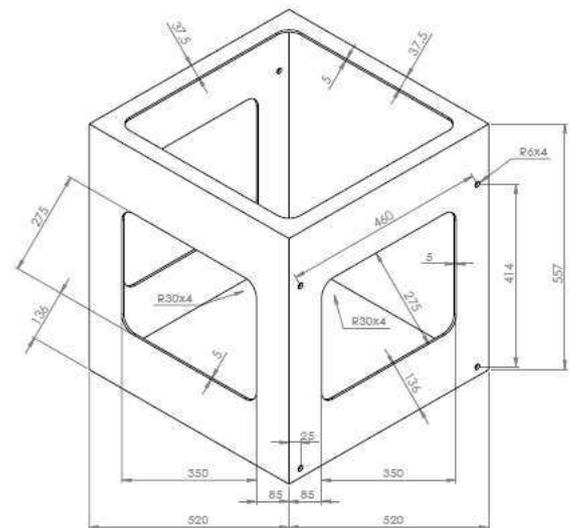


Figura 5(b). Dimensões da Caixa Externa.

A estrutura adicionada ao modelo possui um comportamento dinâmico durante a execução do processo de impressão, dessa forma, na modelagem numérica da estrutura através do MEF utilizando o programa ANSYS foi necessário analisar os modos e frequências naturais das nove configurações possíveis. A tabela

4 indica os resultados obtidos no programa ANSYS referente à configuração adotada como *referência* durante as análises posteriores, o posicionamento da estrutura é o apresentado na figura 4.

Tabela 4. Frequências Naturais da Estrutura de Ferro Atualizada obtidas no programa Ansys.

Modo	Frequência (Hz)
1	40,9
2	41,5
3	42,6
4	44,9
5	49,5
6	70,2
7	111,2
8	130,1
9	142,0
10	157,1
11	167,7
12	184,4
13	190,5
14	196,3
15	206,2
16	223,2
17	223,6
18	230,2
19	233,2
20	249,8

Os resultados dos modos e frequências das demais configurações foram comparados com os dados da Tabela 4 referentes à configuração referência. Verificou-se que as diferenças consideráveis de valores de frequências naturais referem-se às configurações 4, 5 e 6 como ilustradas na figura 6. Os valores de frequências naturais referentes a estas configurações são de 10 a 20% menores quando comparados valor da referência.

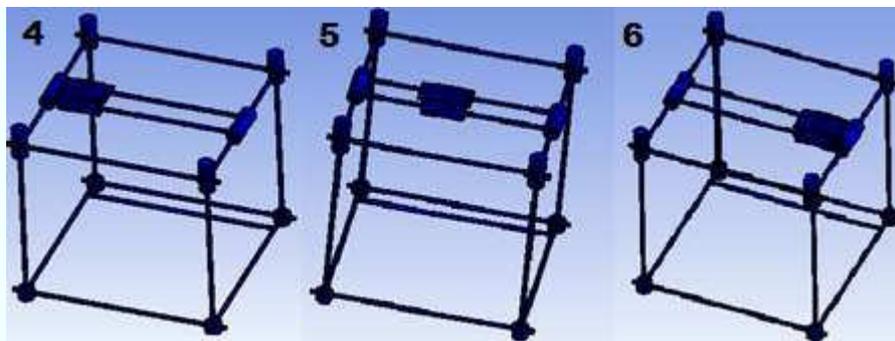


Figura 6. Análise da Deformação Total das Configurações 4,5 e 6, respectivamente.

3.5 Análise dos modos de vibrar

A análise comportamental de cada um dos vinte modos de vibrar foi essencial para verificar qual parte, junta ou barra da estrutura estaria mais comprometida em cada modo respectivamente. Os resultados foram base para o posicionamento do martelo na etapa experimental. A figura 7 ilustra o comportamento dos modos de vibrar 1, 2, 3 e 4, estes primeiros modos são caracterizados por uma movimentação global de toda estrutura, com os maiores deslocamentos nas juntas inferiores destacadas na imagem.

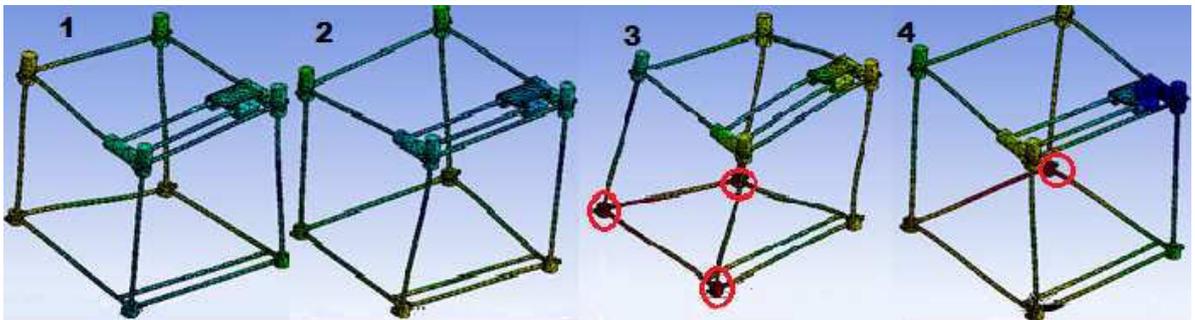


Figura 7. Análise dos modos de vibrar 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Os modos de vibrar 5, 6, 7 e 8 estão representados na figura 8. No modo de vibrar cinco verifica-se a movimentação global da estrutura, porém os maiores deslocamentos estão nas duas juntas superiores. O modo seis apresenta maiores deslocamentos nas duas juntas inferiores, mantendo as barras superiores estáveis durante a movimentação. O modo sete movimenta toda a estrutura, com maior deslocamento no meio da barra em destaque, enquanto isso, todas as barras são movimentadas para baixo e para cima sucessivamente. Já o modo oito apresenta maiores deslocamentos somente um lado da estrutura e ao meio das barras indicadas.

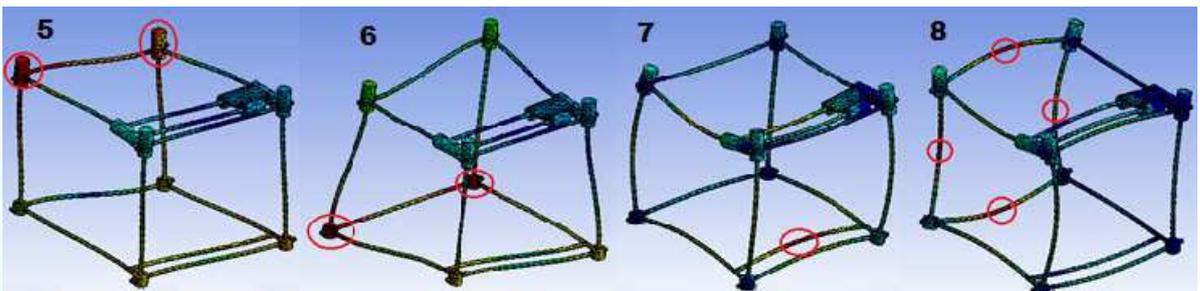


Figura 8. Análise dos modos de vibrar 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

A figura 9 ilustra os modos 9, 10, 11 e 12. O modo nove apresenta um comportamento similar ao modo oito, os maiores deslocamentos estão apenas em um lado da estrutura e ao meio das barras em destaque. No modo dez inicia-se a movimentação local da estrutura, os deslocamentos estão concentrados na barra em destaque localizada no lado mais solicitado da estrutura. O modo onze apresenta maiores deslocamentos na barra em destaque, que neste caso encontra-se no lado mais solicitado. E, o modo doze apresenta movimentação local de apenas um lado, com maiores deslocamentos nas barras inferiores, principalmente na barra indicada.

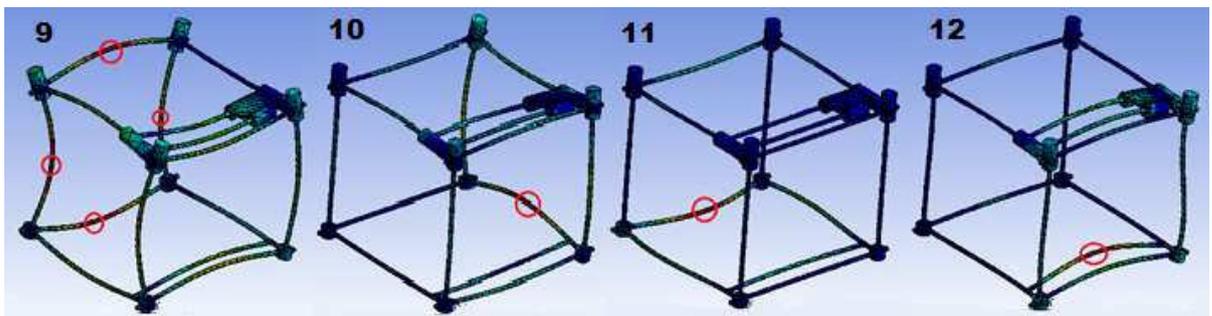


Figura 9. Análise dos modos de vibrar 9, 10, 11 e 12, respectivamente.

Os modos 13, 14, 15 e 16 são apresentados na figura 10. No modo treze ocorre a movimentação local da barra em destaque, onde estão os maiores deslocamentos. Já no modo quatorze a movimentação retorna a ser de forma global, a movimentação principal deve-se as quatro barras inferiores. No modo quinze a movimentação principal está associada às barras superiores, os maiores deslocamentos estão concentrados na barra indicada. E, no modo dezesseis ocorre também a movimentação global de toda a estrutura, movimentação principal das barras inferiores.

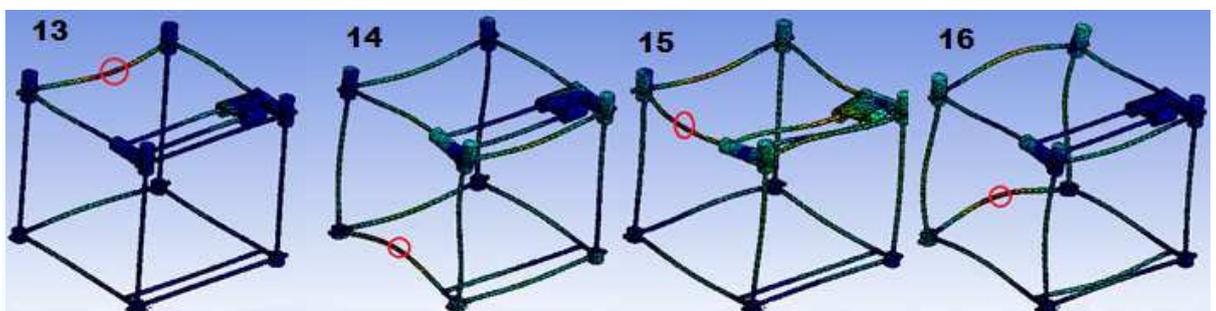


Figura 10. Análise dos modos de vibrar 13, 14, 15 e 16, respectivamente.

A figura 11 apresenta os modos 17, 18, 19 e 20. Nos modos dezessete, dezoito e dezenove ocorre a movimentação global de toda a estrutura, os maiores deslocamentos estão concentrados nas barras indicadas, as barras inferiores se

movimentam de forma alternada. Já o modo vinte apresenta uma movimentação local, que ocorre principalmente na barra em destaque.

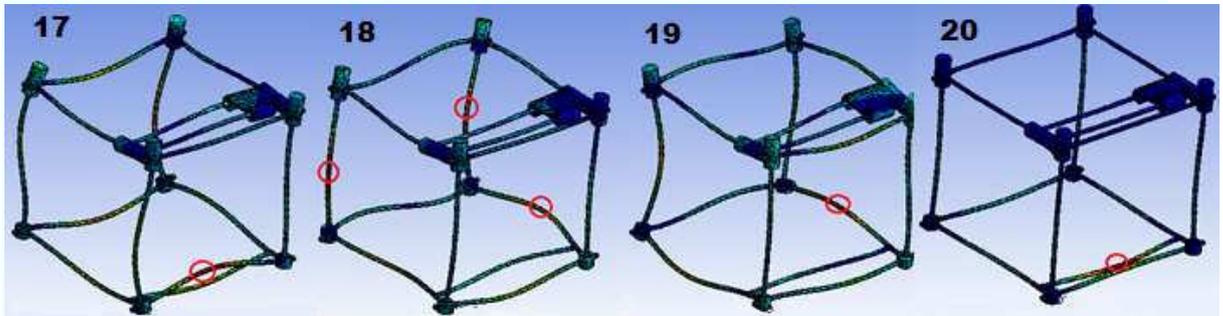


Figura 11. Análise dos modos de vibrar 17, 18, 19 e 20, respectivamente.

3.6 Análise Experimental

A etapa de obtenção dos dados experimentais foi realizada em conjunto com a aluna de graduação Natália Mendonça, que participa do projeto de Iniciação Científica no tema de aquisição e análise dos dados experimentais com o professor Eduardo Okabe, do Laboratório de Prototipagem Automação e Simulação (LAPS) da FCA Unicamp. O seu projeto tem como objetivo aperfeiçoar o sistema de medição existente e testá-lo sob diferentes condições de uso e realizar o processamento dos sinais proveniente do sistema de medição. Para analisar a resposta dinâmica da máquina de prototipagem, o projeto se fundamentará na medição experimental desta resposta através da utilização de acelerômetros montados na própria máquina. Como o sistema de medição possui um ruído inerente ao seu funcionamento, foi necessário testar quais técnicas de processamento e filtragens digitais podem ser aplicadas em cada caso, e extrair o melhor resultado possível considerando todas as restrições.

A Tabela 5 apresenta os resultados da FRF (Frequency-Response-Function), obtidos a partir dos testes realizados com um martelo de impacto, o método de resposta de frequência consiste em variar a frequência do sinal de tensão aplicado à estrutura da impressora, em uma determinada faixa de frequência e analisar a resposta de saída.

Tabela 5. Frequências obtidas a partir do teste do martelo.

Modo	Frequência (Hz)
1	5,9
2	10,2
3	18,5
4	31,7
5	42
6	60,5
7	67,3
8	81,4
9	104,4
10	118,5

O teste FFT é caracterizado pela utilização de acelerômetros na estrutura da impressora, processamento em programas com Código G, compilação e análise dos dados gerados no programa Matlab. As frequências iniciais obtidas a partir do teste FFT, apresentaram muito ruído devido principalmente à vibração característica do motor de passo presente na estrutura do cabeçote da impressora, dessa forma, foi necessária a utilização da técnica de decimação a fim de filtrar o ruído do motor de passo, obtendo frequências mais semelhantes às encontradas no teste do martelo. A decimação é uma técnica de processamento digital que captura os sinais do mundo real e, em seguida, reduz matematicamente a taxa de aquisição. Pode ser aplicada para melhorar a qualidade do sinal, além de reduzir a memória e o tempo de processamento do sinal. Os resultados finais do teste FFT estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6. Frequências obtidas no teste FFT, sem a interferência do motor de passo.

Modo	Frequência (Hz)
1	6,4
2	12
3	17,8
4	29,8
5	41,6
6	47,8
7	53,8
8	65,6
9	77,6
10	83,4

Verifica-se que as frequências naturais apresentadas na tabela 5 e 6 são similares entre os primeiros cinco modos, mas a partir do sexto modo os resultados começaram a se divergir, isto se deve principalmente ao fato de que o teste FRF foi realizado com a estrutura ligada e sem movimento, enquanto no teste FFT houve a movimentação do cabeçote da impressora. E, também devido à interferência associada ao motor de passo acoplado ao cabeçote, por possuir sua própria frequência natural, interferindo na análise dos resultados.

Ao comparar os resultados finais obtidos a partir do programa ANSYS com a etapa experimental, percebe-se que os resultados do modelo numérico se assemelham mais aos resultados do teste FRF realizado com o martelo, isto se deve ao fato dos dois testes serem realizados com a estrutura sem movimento, com o

posicionamento do cabeçote na configuração adotada como referência. A frequência natural do quinto modo no teste do FRF é bem similar às frequências dos primeiros modos obtidos no programa ANSYS, no caso do modelo numérico os valores referentes aos seis primeiros modos foram descartados, os seus valores eram baixos, se aproximando dos quatro primeiros valores encontrados no teste FRF.

As diferenças entre os resultados do ANSYS e FRF podem ainda estar associados à influência da vibração do motor de passo mesmo com o cabeçote parado sem movimento, por ter uma vibração característica e influenciar diretamente os resultados obtidos. E, também devido à estimativa do peso do cabeçote na montagem do modelo numérico, enquanto a etapa experimental obteve resultados mais reais de certa forma por realizar as análises com o peso verdadeiro do cabeçote da impressora.

3.7 Desmontagem e Pesagem da estrutura

A fim de minimizar as interferências vibratórias dos componentes presentes na impressora 3D, foi necessário desmontar toda a estrutura para realizar os testes experimentais apenas com a estrutura interna de ferro, para que os resultados finais não apresentassem os ruídos dos motores de passo do cabeçote. A Figura 12(a) ilustra a forma final da impressora que será utilizada nos testes experimentais. E, a Figura 12(b) representa a pesagem realizada, a estrutura final apresentou o peso de 6,22 kg, a pesagem foi importante para adequar o modelo numérico.



Figura 12 (a). Estrutura Final.



Figura 12(b). Pesagem.

3.8 Modelo Numérico da Estrutura Final

Após a desmontagem foi necessário alterar o modelo numérico da estrutura interna de ferro para que o modelo apresentasse um valor de massa igual ao projeto real. Dois recortes nas juntas superiores foram realizados e a densidade das juntas superiores e inferiores foram modificadas, pois apresentam furos e cavidades internas ocas. A Figura 13 ilustra o modelo numérico final. A massa final do modelo numérico foi igual a 6,26 kg.

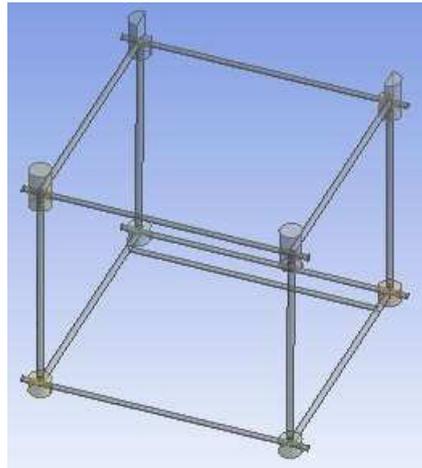


Figura 13. Modelo Numérico Estrutura Interna Final.

E, a Tabela 7 apresenta os resultados das frequências naturais obtidas no programa Ansys a partir do modelo numérico final da estrutura interna.

Tabela 7. Frequências da estrutura interna final obtida no Ansys.

Modo	Frequência (Hz)
1	39,3
2	43,9
3	44,2
4	47,6
5	52,5
6	69,8
7	143,3
8	156,4
9	164,5
10	176,8
11	190,9
12	198,1
13	206,9
14	222,2
15	225,9
16	228,6
17	244,0
18	246,4
19	249,4
20	252,4

3.9 Teste Modal

Hoje, os problemas de vibração estrutural representam uma grande ameaça e limitação de projeto para uma ampla gama de produtos de engenharia. Desde os primeiros dias da conscientização das vibrações, foram feitas observações experimentais principalmente para verificar modelos e previsões teóricas. Os modelos são obtidos por testes em que a estrutura é vibrada com uma excitação conhecida, fora do seu ambiente de serviço normal. Este teste é geralmente feito em condições controladas e conseqüentemente produz informações precisas e detalhadas. Este tipo de teste, incluindo a aquisição de dados e sua análise subsequente, é denominado "Teste Modal" (EWINS, 1984).

A aplicação comumente utilizada é a medição dos modos de vibração para compará-los com dados correspondentes produzidos por um elemento finito ou outro modelo teórico. A FRF - Função de Resposta de Frequência apresenta relevância particular, isto se deve ao fato de que elas são as quantidades que é mais provável que possamos medir na prática. É possível descrever cada função de resposta de frequência individual em termos de vários elementos de massa, rigidez e amortecimento do sistema, mas as expressões relevantes são extremamente complexas (EWINS, 1984).

Essencialmente, existem três aspectos do processo de medição que exigem atenção especial para garantir a aquisição dos dados de alta qualidade necessária: os aspectos mecânicos de apoiar e estimular a estrutura, a transdução correta das quantidades a serem medidas e o processamento do sinal apropriado para o tipo de teste utilizado. A mecânica da excitação é conseguida conectando um gerador de vibração, ou agitador, ou usando alguma forma de entrada transitória, como um golpe de martelo ou liberação repentina de uma posição deformada. Ambas as abordagens têm vantagens e desvantagens e pode ser muito importante escolher o melhor em cada caso (EWINS, 1984).

O método mais usado na excitação da estrutura é através do uso de um pêndulo ou martelo. Embora este tipo de teste ofereça maiores demandas na fase de análise do processo de medição, é um meio relativamente simples. Basicamente, a magnitude do impacto é determinada pela massa do martelo e o impacto é determinado pela massa da estrutura. Quando a ponta do martelo afeta a estrutura de teste, este experimentará um pulso de força que é substancialmente o de uma

forma de meio seno. Entretanto, uma das dificuldades de aplicar excitação usando um martelo é garantir que cada impacto seja essencialmente o mesmo que os anteriores, não tanto em magnitude como em orientação em relação a normal para a superfície. Ao mesmo tempo, os impactos múltiplos ou o salto do martelo devem ser evitados, pois estes criam dificuldades no estágio de processamento do sinal (EWINS, 1984).

3.10 Software OpenModal

OpenModal é um software de análise modal experimental escrito em Python. A interface do programa é dividida em algumas etapas para utilização. A primeira etapa corresponde à definição de geometria e, permite que você crie seus modelos a partir de nós com coordenadas especificadas e sistemas de coordenadas. Em seguida, é a etapa de medição de sinais, os dados podem ser adquiridos em experiências utilizando o hardware da *National Instruments*. A análise modal operacional e experimental é suportada através das opções de diferentes sinais de excitação, como impulsos ou aleatórios. Na análise modal os parâmetros modais são identificados por um processo de ajuste de curva que é usado para estimar os pólos. Os métodos LSCF e LSCE estão disponíveis. E, na etapa final de visualização os dados medidos e analisados podem ser visualizados e animados, revelando informações sobre a dinâmica da estrutura. Cada modo identificado ou medido é visualizado com base no espectro de resposta de frequência (OpenModal).

Um teste experimental foi realizado a fim de entender o funcionamento do software, e um tutorial foi escrito a fim de auxiliar os demais alunos do Laboratório de Prototipagem Automação e Simulação (LAPS) que futuramente podem dar continuidade neste estudo. O tutorial apresenta certas explicações específicas para utilizar o martelo de impacto e os acelerômetros disponíveis para testes no laboratório.

Ao final dos testes foi verificado que o software ainda não apresenta a ferramenta de “média linear” para a forma de impulso do martelo de impacto, até o momento esta ferramenta está ativa somente para a opção “random” que corresponde ao equipamento de vibração Shaker, e isto foi confirmado ao entrar em contato com os desenvolvedores do software.

3.11 Testes Experimentais no OpenModal

3.11.1 Viga

Dois testes experimentais foram realizados a fim de comparar os valores das frequências naturais obtidas no software OpenModal com os resultados gerados no programa ANSYS e a verificação do comportamento de cada modo de vibrar. A primeira estrutura simulada foi uma viga e, em seguida o mesmo procedimento foi realizado para uma chapa, ambas as estruturas correspondem ao aço 1020 e estão ilustradas na Figura 14.



Figura 14. Estrutura da Viga e Chapa.

O primeiro teste foi realizado com a estrutura da viga, o modelo foi criado no software CREO e, em seguida importado no software ANSYS, e os resultados referentes às frequências naturais obtidas estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8. Frequências da Viga obtidas no ANSYS.

Modo	Frequência (Hz)
1	136,8
2	376,8
3	564,6
4	738,0
5	1218,8
6	1430,5
7	1529,5
8	1818,7
9	2537,4
10	2865,9

Em seguida, o comportamento dos dez primeiros modos de vibrar foram verificados, os mesmos modos com os valores descritos anteriormente. A Figura 15 apresenta os modos 1, 2, 3 e 4 da viga, verifica-se que os maiores deslocamentos estão localizados nas duas extremidades das vigas.

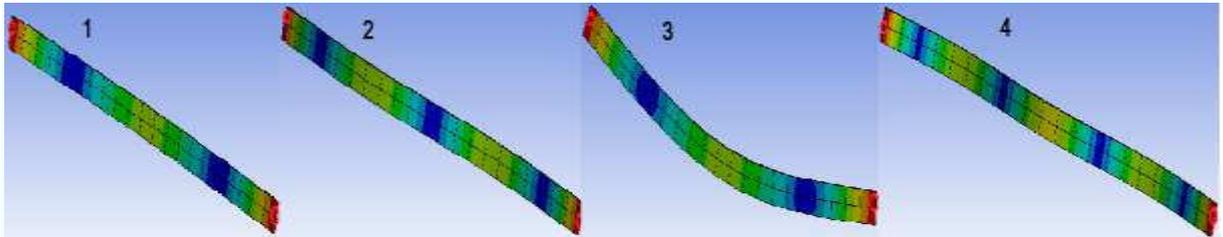


Figura 15. Análise dos modos de vibrar 1, 2, 3 e 4, respectivamente, da Viga.

A Figura 16 apresenta os modos de vibrar 5, 6, 7 e 8, percebe-se que o modo 6 apresenta uma movimentação de torção, e o modo 7 uma movimentação circular ao longo da viga.

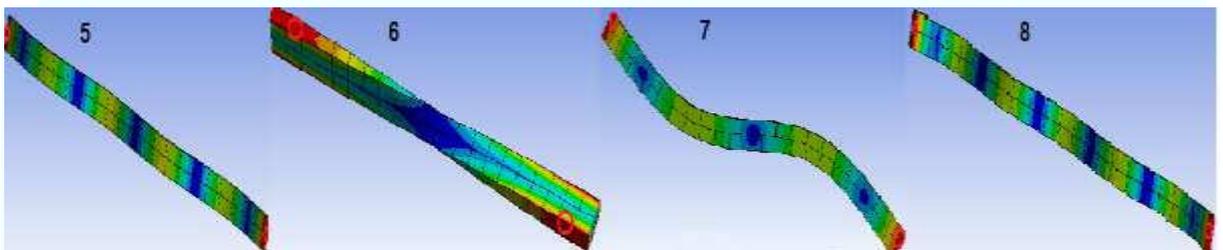


Figura 16. Análise dos modos de vibrar 5, 6, 7 e 8, respectivamente, da Viga.

E, os modos 9 e 10 estão representados na Figura 17. Pode-se verificar que o último modo apresenta um comportamento de torção, e, os deslocamentos permanecem localizados nas extremidades das vigas.

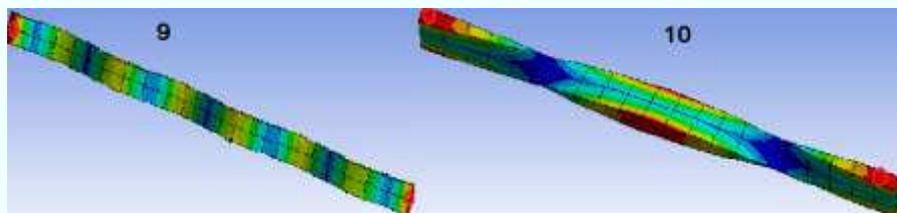


Figura 17. Análise dos modos de vibrar 9 e 10, respectivamente, da Viga.

Em seguida o modelo da viga foi gerado no software OpenModal, e, os resultados das frequências naturais foram obtidas. A Figura 18 representa a análise da viga no software.



Figura 18. Análise da Viga no OpenModal.

Os valores das frequências ilustrados anteriormente foram tabelados, e estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9. Frequências da Viga obtidas no OpenModal.

Modo	Frequência (Hz)
1	143,1
2	395,1
3	773,5
4	1272,8
5	1381,6
6	1864,2
7	1887,6
8	1889,9
9	2503,4
10	2504,8

Verifica-se que os resultados das frequências naturais obtidas no ANSYS são compatíveis com os resultados do OpenModal, validando o modelo criado. A Figura 19 apresenta os modos de vibrar obtidos no software OpenModal, as variações entre os modos são quase imperceptíveis, verifica-se que o programa ainda apresenta limitações para ilustrar os modos.



Figura 19. Análise dos modos de vibrar 1, 2 e 3, respectivamente, da Viga no OpenModal.

3.11.2 Chapa

Em seguida o mesmo procedimento foi realizado para a estrutura da chapa. A Tabela 10 apresenta as frequências naturais da chapa obtidas no software ANSYS.

Tabela 10. Frequências da Chapa obtidas no ANSYS.

Modo	Frequência (Hz)
1	24,4
2	29,0
3	41,9
4	65,2
5	68,9
6	74,4
7	106,3
8	130,1
9	135,6
10	140,3
11	141,4
12	189,1
13	202,9
14	225,6
15	237,2
16	237,8
17	241,3
18	298,0
19	299,8
20	317,2

A Figura 20 apresenta os modos de vibrar 1, 2, 3 e 4 da estrutura da chapa obtidas no programa ANSYS. O local de maior deslocamento aparece em destaque nas imagens, verifica-se que nos modos 1 e 4 o maior deslocamento ocorre no canto superior, enquanto nos modos 2 e 3 ocorre nos cantos inferiores.

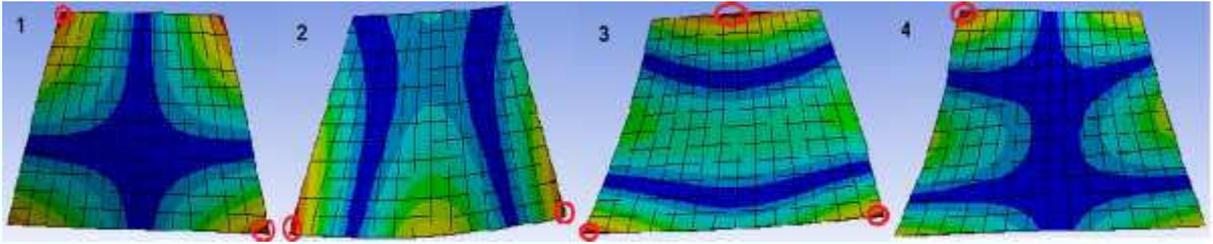


Figura 20. Análise dos modos de vibrar 1, 2, 3 e 4, respectivamente, da Chapa.

Os modos de vibrar 5, 6, 7 e 8 estão ilustrados na Figura 21, é possível verificar que os maiores deslocamentos nos modos 5, 7 e 8 ocorrem na parte superior da chapa.

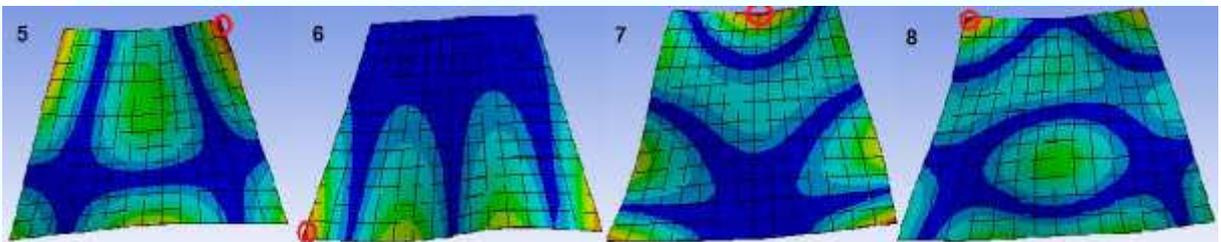


Figura 21. Análise dos modos de vibrar 5, 6, 7 e 8, respectivamente, da Chapa.

A Figura 22 apresenta os modos de vibrar 9, 10, 11 e 12, percebe-se que o modo 11 apresenta o maior deslocamento na região lateral da chapa, enquanto os modos 9 e 10 continuam apresentando os maiores deslocamentos nos cantos inferiores.

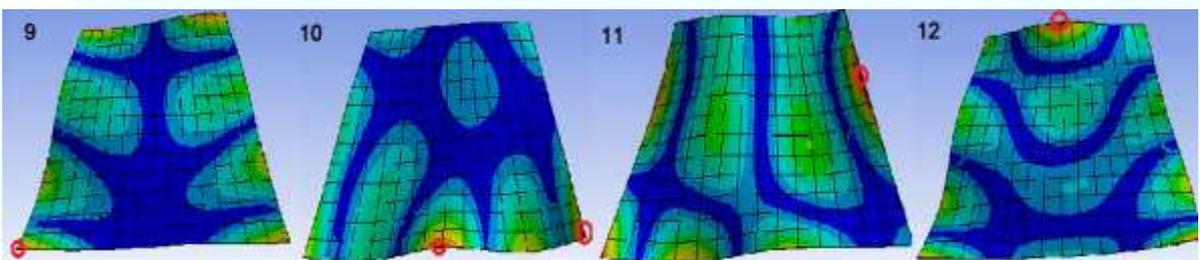


Figura 22. Análise dos modos de vibrar 9, 10, 11 e 12, respectivamente, da Chapa.

Os modos 13, 14, 15 e 16 estão representados na Figura 23, o modo 14 apresenta os maiores deslocamentos ao meio da aresta inferior da chapa, e, o modo 13 apresenta nos cantos superiores.

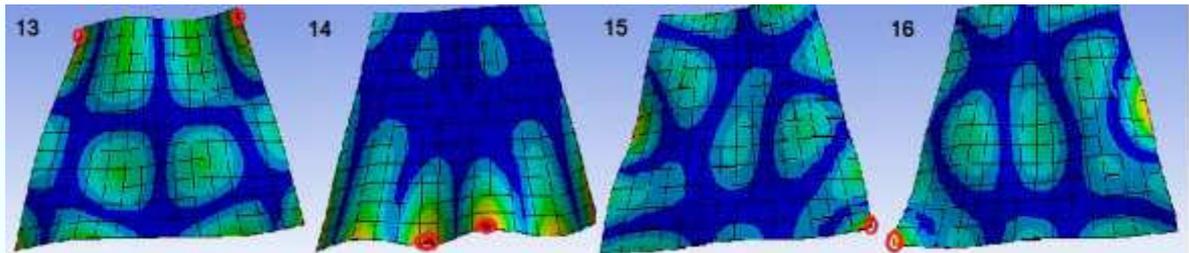


Figura 23. Análise dos modos de vibrar 13, 14, 15 e 16, respectivamente, da Chapa.

A Figura 24 ilustra os modos de vibrar 17, 18, 19 e 20, verifica-se que os maiores deslocamentos estão posicionados na região superior da chapa.

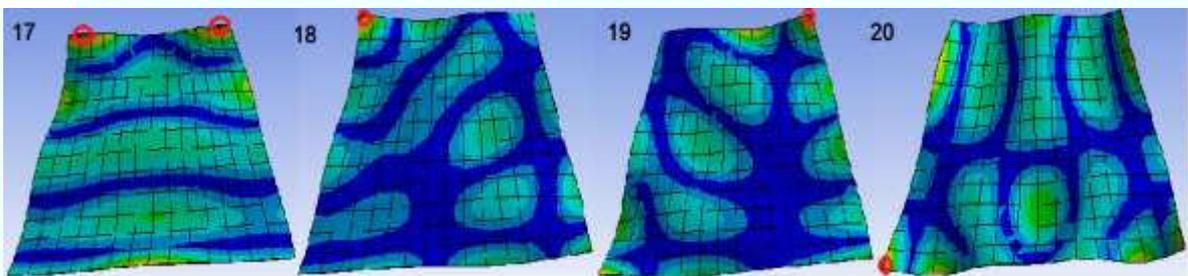


Figura 24. Análise dos modos de vibrar 17, 18, 19 e 20, respectivamente, da Chapa.

A Figura 25 ilustra a análise realizada no software OpenModal para a estrutura da Chapa.

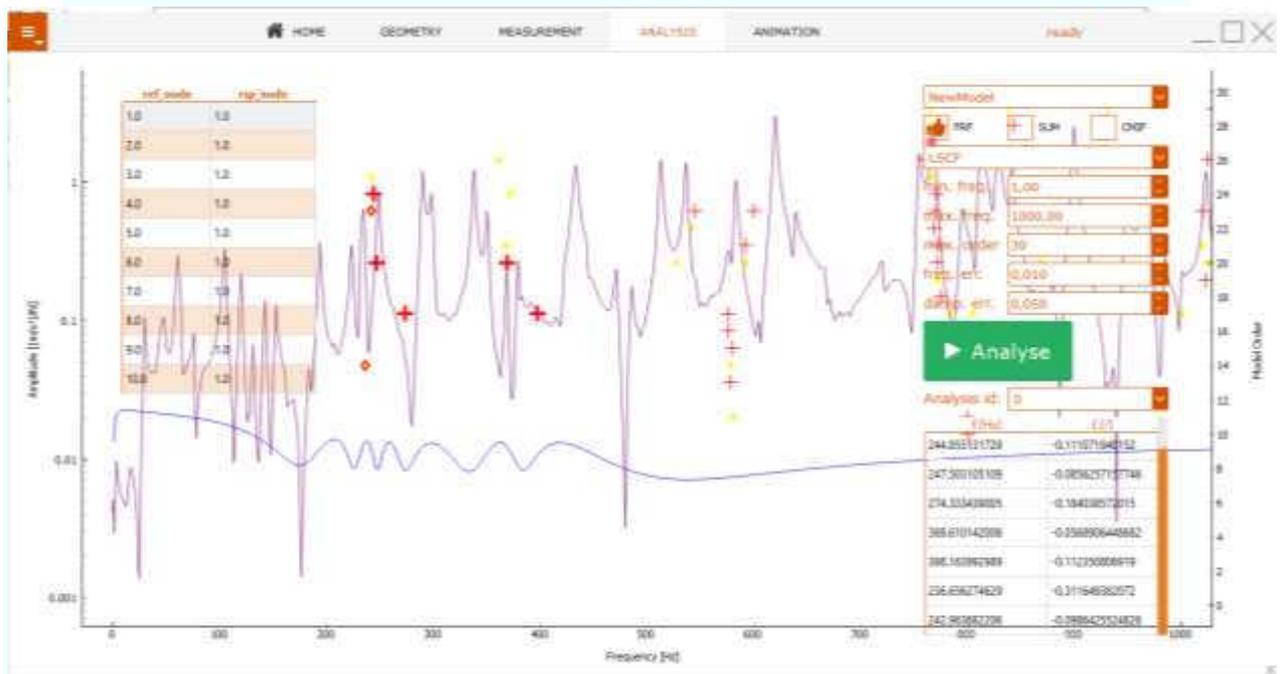


Figura 25. Análise da Chapa no OpenModal.

Os valores obtidos para as frequências foram tabelados, e estão representados na Tabela 11.

Tabela 11. Frequências da Chapa obtidas no OpenModal.

Modo	Frequência (Hz)
1	22,0
2	31,5
3	49,0
4	67,5
5	69,0
6	78,0
7	109,5
8	140,0
9	143,0
10	145,0
11	169,0
12	195,0
13	210,0
14	231,0
15	245,0
16	251,0
17	263,0
18	305,0
19	315,0
20	332,0

Em seguida, os modos de vibrar da chapa foram verificados no software OpenModal e estão ilustrados na Figura 26, poucas variações entre os modos podem ser verificadas, isso deve-se a certas limitações do software.

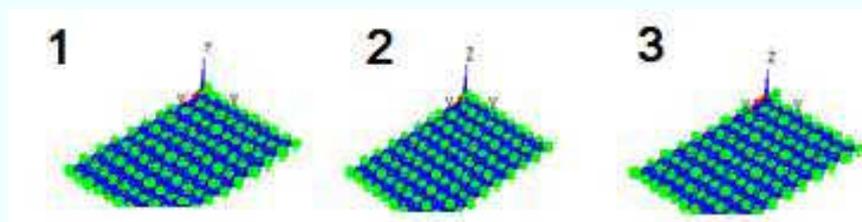


Figura 26. Análise dos modos de vibrar 1, 2 e 3, respectivamente, da Chapa no OpenModal.

Comparando os resultados dos dois softwares percebe-se que os valores das frequências naturais são similares validando o modelo. A simulação do modelo da chapa serviu para o estudo de diferentes geometrias no software OpenModal.

3.12 Diagrama de Blocos

O estudo do software se tornou uma etapa necessária para continuidade do estudo, pois, verificou-se que o mesmo até o momento não gera os resultados desejados. O diagrama de blocos foi realizado a partir do código chamado *Skeleton*, que corresponde a programação base do software OpenModal. A Figura 27 apresenta o diagrama de blocos do programa.

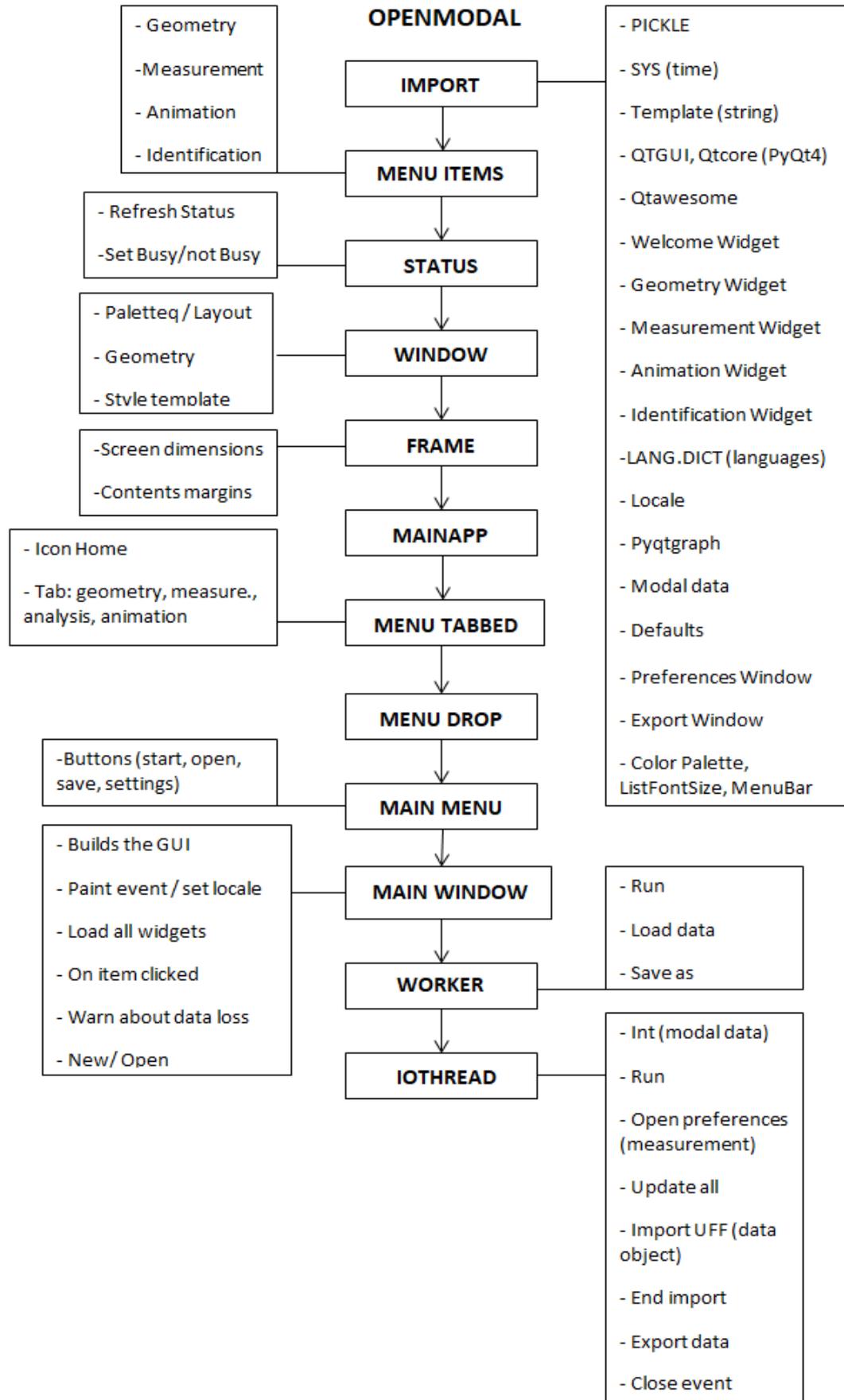


Figura 27. Diagrama de Blocos.

3.13 Implementação Média Linear

O próximo passo para a continuidade desta pesquisa seria a implementação da ferramenta “média linear” para a forma de impulso do martelo de impacto. Os desenvolvedores do programa indicaram os três códigos da programação que estão relacionados com a função média e que devem ser analisados primeiramente, são eles: *OpenModal/gui/widgets/measurement.py*, *OpenModal/gui/preferences_window.py*, e, *OpenModal/daqprocess.py*. Uma análise superficial da programação foi realizada a fim de identificar o local de armazenamento dos dados e, também como a função média está sendo realizada para a opção “random”, para uma tentativa de adaptação da mesma, porém, a dificuldade em compreender a programação escrita em linguagem avançada em Python dificultou a continuidade do estudo. Para uma possível continuação do trabalho sugere-se a criação de um local para armazenamento de dados das frequências naturais para que em seguida seja calculada a média das batidas e, seja devolvido ao usuário o gráfico da FRF a partir da média calculada.

4 CONCLUSÕES

A pesquisa atingiu o seu objetivo esperado, o modelo numérico da estrutura da impressora 3D foi desenvolvido a partir do Método dos Elementos Finitos e validado experimentalmente, a partir da comparação das frequências naturais obtidas numericamente com os dados dos testes experimentais FRF e FFT. Na etapa final de comparação dos resultados verificou-se que de certa forma os resultados foram semelhantes e satisfatórios, porém alguns pontos devem ainda ser melhorados a fim de tornar o modelo numérico cada vez mais “real” e como certos fatores externos também podem ser evitados para diminuir a interferência de vibração.

Os possíveis erros no projeto podem estar associados à interferência do motor de passo do cabeçote, por apresentar sua própria vibração, o próprio local onde os testes experimentais foram realizados, a impressora estava posicionada em cima de uma mesa que apesar de ser estável apresentava certa vibração característica; o erro humano de manuseio de equipamentos e precisão da força aplicada ao martelo em esforços repetitivos durante o teste de FRF.

O estudo do software OpenModal possibilitou a validação dos modelos de uma viga e uma chapa simulados no software ANSYS. O conhecimento do funcionamento de um software voltado para a área de análise modal foi de grande aprendizado. Verificou-se que o programa ainda não gera os resultados da FRF a partir de uma média linear como o esperado, tem-se como passo para continuidade do estudo a implementação desta ferramenta no software, porém o pesquisador deve ter conhecimento avançado na linguagem Python para o entendimento dos códigos de programação.

Ao término do Trabalho de Conclusão de Curso, destaca-se o cumprimento dos prazos estabelecidos para a execução de cada atividade específica; o conhecimento teórico-prático adquiridos na realização do projeto, sendo um grande diferencial para a formação acadêmica, pois, a maior parte dos assuntos não é abordada nas disciplinas do curso de graduação em Engenharia de Manufatura; e também a qualidade dos resultados obtidos que podem ser base para continuação do estudo futuramente.

5 REFERÊNCIAS

BITTENCOURT, M. L, **Introdução ao Método dos Elementos Finitos Aplicado à Análise Estrutural - Exemplos com o programa Ansys**. 2007.

CLOUGH, R. W. PENZIEN, J. **Dynamics of Structures** .Computers & Structures Inc. University Ave, Berkeley, USA,2003.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory and practice**. Research Studies Press, 1984 - Technology & Engineering - 269 pages.

FERREIRA, A.J.M, **MATLAB Codes for Finite Element Analysis: Solids and Structures**. Universidade do Porto. Portugal: Springer, 2009. Volume 157.

GARCIA, L. H.Tobler. **Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D para cerâmicas**. Orientador: Benedito de Moraes Purquerio. Dissertação (Mestrado Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto Mecânico. São Carlos, 2010).

INMAN, D. J., **Vibration with Control**, Johns Willey & Sons, pp.198201, 2006.

KWON, Y.W; BANG, H. **The Finite Element Method using Matlab**. CRC Mechanical Engineering Series, 1997.

MEIROVITCH, L. **Fundamentals of Vibration**. College of Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1986.

MYREN, M.OLSSON, J. **Modal Analysis of Exhaust System**. Department of Mechanical Engineering, University of Karlskrona/Ronneby Karlskrona, Sweden,1999.

OpenModal. **The complete experimental modal analysis procedure**. Disponível em: <<http://www.openmodal.com/>> Acesso em: 10/09/2017.

RAIA, F. **Metodologias para o Estudo de Vibrações Mecânicas: De Holzer aos Elementos Finitos**. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011.

RAULINO, B. R. **Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida**. Trabalho de graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG 2011 Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida tecnologias e aplicações** . São Paulo: Edgar Blücher, 2007.