



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**YURI GARBIN DAINESE**

**DESENVOLVIMENTO DE MARTELO DE IMPACTO DE BAIXO  
CUSTO PARA ENSAIO MODAL EM ESTRUTURAS**

**OURO PRETO - MG  
2023**

**YURI GARBIN DAINESE**  
**yuri.dainese@aluno.ufop.edu.br**

**DESENVOLVIMENTO DE MARTELO DE IMPACTO DE BAIXO  
CUSTO PARA ENSAIO MODAL EM ESTRUTURAS**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** DSc. Gustavo Paulinelli Guimarães

**OURO PRETO – MG**  
**2023**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D133d Dainese, Yuri Garbin.

Desenvolvimento de martelo de impacto de baixo custo para ensaio modal em estruturas. [manuscrito] / Yuri Garbin Dainese. - 2023.  
48 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Engenharia mecânica. 2. Análise Modal. 3. Ressonância. 4. Mecânica - vibração. 5. Ferramentas - martelo de impacto. I. Guimarães, Gustavo Paulinelli. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Gracilene Maria De Carvalho - SIAPE: 2.010.510



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Yuri Garbin Dainese**

### **Desenvolvimento de martelo de impacto de baixo custo para ensaio modal em estruturas**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 13 de março de 2023

#### Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto  
Prof. Dr. Vinícius Carvalho Teles - Universidade Federal de Ouro Preto  
Profa. Me. Cristina Alves Maertens - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/04/2023, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0511250** e o código CRC **1802F968**.

Agradeço principalmente aos meus pais, professores e à Gloriosa República Quitandinha por todo o apoio ao longo dessa gigantesca caminhada.

## **AGRADECIMENTO**

Ao meu orientador Gustavo Paulinelli pela paciência e dedicação para me auxiliar neste trabalho.

Aos professores da Mecânica e à Escola de Minas pelo ensino de qualidade e oportunidade de crescimento.

Aos meus pais, Quitandinha e Helô pelo apoio.

*“We are Motörhead and we play Rock n’ Roll”*

Lemmy Kilmister

## RESUMO

Para o presente trabalho foi construído um martelo de impacto instrumentado de baixo custo, o qual foi projetado através de softwares CAD e fabricado através de manufatura aditiva. Testes de impacto utilizando o martelo protótipo foram realizados para a obtenção das funções de resposta em frequência (FRF) visando entender como desenvolver um martelo de impacto de baixo custo para ensaio modal de estruturas. Os resultados obtidos através dos testes foram comparados com as FRFs geradas utilizando um martelo comercial de referência. A fim de garantir a capacidade do protótipo desenvolvido para o trabalho foram comparados os valores de frequências naturais obtidas por ambos os martelos com a finalidade de identificar se os picos observados em cada FRF eram coincidentes. Além disso, os amortecimentos modais de quatro picos observados tanto nas FRFs de ponto quanto nas de transferência foram calculados através da técnica da meia potência. O objetivo foi de avaliar os resultados em busca da resposta se o martelo de impacto de baixo custo pudesse ser de fato aplicado em ensaios modais experimentais sem o risco de gerar resultados não conformes. Aplicando testes de impacto, foi possível observar que o martelo desenvolvido para o trabalho foi capaz de identificar frequências naturais com um erro percentual de 2,2% e estimar amortecimentos modais com pelo menos 90% de semelhança com o martelo de impacto de referência, para estruturas com baixo amortecimento.

**Palavras-chave:** Vibração mecânica. Teste de impacto. Análise Modal. Martelo de impacto. Dinâmica de estruturas. Frequência natural. Ressonância



## ABSTRACT

*For the present work, a low-cost instrumented impact hammer was constructed, which was designed using CAD software and manufactured through additive manufacturing. Impact tests using the prototype hammer were conducted to obtain frequency response functions (FRFs) in order to understand how to develop a low-cost impact hammer for modal testing of structures. The results obtained from the tests were compared with the FRFs generated using a commercial reference hammer. To ensure the capability of the developed prototype for the work, the natural frequency values obtained by both hammers were compared to identify if the peaks observed in each FRF were coincident. In addition, the modal damping of four peaks observed in both point and transfer FRFs were calculated using the half-power technique. The objective was to evaluate the results to determine whether the low-cost impact hammer could actually be applied in experimental modal tests without the risk of generating non-conforming results. By conducting impact tests, it was possible to observe that the hammer developed for the study was able to identify natural frequencies with a percentage error of 2.2% and estimate modal damping with at least 90% similarity to the reference impact hammer, for structures with low damping.*

**Keywords:** *Mechanical vibration. Impact testing. Modal analysis. Impact hammer. Structural dynamics. Natural frequency. Resonance*

**LISTA DE SIMBOLOS**

$\tilde{F}$  = Força de impulso [Ns]

$c_c$  = Constante de amortecimento viscoso [Ns/m]

$\dot{x}$  = Primeira derivada temporal da posição [m/s]

$\ddot{x}$  = Segunda derivada temporal da posição [m/s<sup>2</sup>]

$x_0$  = Posição inicial [m]

$\omega_d$  = Frequência de vibração amortecida [rad/s]

$\omega_n$  = Frequência natural [rad/s]

$\phi_j$  = Angulo de fase do j-ésimo modo [rad]

$\Delta t$  = Incremento no tempo [s]

$F(t)$  = Força [N]

$k$  = Constante de elástica [N/m]

$m$  = Massa [kg]

$r$  = Razão de frequências

$t$  = Tempo [s]

$x$  = posição [m]

$\zeta$  = Fator de amortecimento

$\tau$  = Período [s]

$\omega$  = Frequência [rad/s]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema com um grau de liberdade sujeito a um impulso.....	6
Figura 2 – Primeiro modo de vibração de uma chave de boca.....	9
Figura 3 – Segundo modo de vibração de uma chave de boca.....	9
Figura 4 – Terceiro modo de vibração de uma chave de boca .....	9
Figura 5 – Função Resposta em Frequência.....	10
Figura 6 - Função resposta em frequência genérico contendo frequências de meia banda.....	12
Figura 7 - Função coerência .....	13
Figura 8 – Teste de impacto .....	13
Figura 9 - Martelo de impacto <i>B&amp;K Tipo 8206</i> .....	15
Figura 10: Cabo do martelo .....	18
Figura 11 - Parte inferior da cabeça do martelo .....	19
Figura 12 - Seção media da montagem do martelo .....	19
Figura 13 - Dimensões gerais do martelo .....	20
Figura 14 - Ponta feita em PETG .....	21
Figura 15 - Ponta de aço .....	21
Figura 16 - Peso extra.....	22
Figura 17 - Martelo montado vista superior. ....	23
Figura 18 - Martelo montado visão do sensor. ....	24
Figura 19 - Montagem realizada na calibração .....	25
Figura 20 - Montagem da calibração utilizando o martelo comercial.....	26
Figura 21 - FRF gerada na calibração usando o martelo <i>B&amp;K Tipo 8206</i> .....	27
Figura 22 - FRF gerada na calibração usando o martelo protótipo .....	28
Figura 23 - Medição da FRF em um ponto .....	29
Figura 24 - Teste de impacto FRF de transferência.....	30
Figura 25 - Teste de impacto inicial para o martelo em desenvolvimento.....	31

Figura 26 - Teste de impacto FRF de transferência com o martelo protótipo.....	31
Figura 27 - Martelo de impacto .....	34
Figura 28 - Martelo de impacto, ponteiros e peso extra .....	35
Figura 29 - Montagem completa do martelo .....	36
Figura 30 - FRF de ponto, ponteira de nylon utilizando o martelo B&K .....	37
Figura 31 – FRF de ponto, ponteira de PETG utilizando o martelo em desenvolvimento .....	38
Figura 32 - Comparação FRF de ponto .....	39
Figura 33 - Função de coerência para a FRF de ponto.....	39
Figura 34 – FRF de transferência, ponteira de nylon utilizando o martelo B&K .....	40
Figura 35 - FRF de transferência, ponteira de PETG utilizando protótipo .....	41
Figura 36 - Comparação FRF de transferência.....	42
Figura 37 - Função de coerência para a FRF de transferência .....	43

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Tabela de calibração .....	28
Tabela 2 - Variáveis e indicadores .....	32
Tabela 3 - Comparação entre as frequências obtidas na FRF de ponto.....	38
Tabela 4 - Comparação entre as frequências obtidas na FRF de transferência .....	41
Tabela 5 - Amortecimentos modais para a FRF ponto .....	43
Tabela 6 - Amortecimentos modais para a FRF transferência .....	44

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	1
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral .....	2
1.3.2	Específicos.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Vibrações Mecânicas .....	4
2.2	Resposta à Força Periódica Geral .....	5
2.2.1	Integral de convolução.....	6
2.2.2	Resposta a um impulso .....	6
2.2.3	Resposta a uma condição forçante geral.....	7
2.3	Análise Modal.....	8
2.3.1	Formas Modais .....	8
2.3.2	Função Resposta em Frequência .....	9
2.3.3	Técnica da Meia Potência.....	11
2.3.4	Função coerência .....	12
2.3.5	Teste de impacto.....	13
2.3.6	Martelos de Impacto .....	14
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
3.1	Tipo de Pesquisa.....	16
3.2	Materiais e Métodos .....	17
3.2.1	Projeto do martelo .....	18
3.2.2	Descrição da montagem do martelo .....	22
3.2.3	Descrição da metodologia da calibração .....	24
3.2.4	Descrição da metodologia da medição .....	28
3.3	Variáveis e Indicadores .....	32
3.4	Instrumentos de Coleta de Dados .....	32
3.5	Tabulação dos Dados.....	33
3.6	Considerações Finais do Capítulo .....	33

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>34</b>
4.1	Martelo de Impacto.....	34
4.2	Frequências Naturais presentes na FRF de ponto.....	36
4.3	Frequências naturais encontradas na FRF de transferência.....	40
4.4	Amortecimento modal para a FRF de ponto .....	43
4.5	Amortecimento Modal para FRF de Transferência .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>45</b>
5.1	Conclusão .....	45
5.2	Proposta de Trabalhos Futuros .....	45
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>47</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

A análise modal de estruturas é de fundamental importância para determinar parâmetros envolvidos na ocorrência de vibrações mecânicas de maneira a possibilitar controlar e compreender a influência das oscilações nas inúmeras estruturas utilizadas no cotidiano.

Segundo Ewins (2000), os problemas associados à vibração estrutural são os que apresentam os maiores perigos e limites de projeto em uma ampla gama de produtos, passando desde pás de turbinas até pontes suspensas, as quais a integridade estrutural é de fundamental importância para o seu correto funcionamento.

Um dos grandes problemas envolvendo oscilações é o fenômeno da ressonância, o qual ocorre sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincide com a frequência de excitação externa (RAO, 2008). O fenômeno da ressonância, tal como os modos de vibrar e os fatores de amortecimento são características descritas pela análise modal.

Segundo Ewins (2000), as características dinâmicas de uma estrutura podem ser determinadas a partir de dois métodos. Tais métodos de acordo com Lofrano (2003) podem ser divididos entre Análise Modal Experimental e Análise Modal Teórica. Sendo que a primeira delas utiliza-se de medições realizadas a partir da oscilação de sensores posicionados em pontos estratégicos da superfície após uma excitação controlada gerada por um martelo de impacto, enquanto na teórica ferramentas computacionais, como o Método dos Elementos Finitos, é empregado.

Considerando o cenário e aplicações envolvendo a Análise Modal tem-se a seguinte pergunta:

**Como desenvolver um martelo de impacto de baixo custo para ensaio modal de estruturas?**

## 1.2 Justificativa

A grande quantidade de estruturas e máquinas empregadas tanto dentro da indústria quanto a nível residencial ilustram a necessidade de se manter o controle e conhecimento dos parâmetros vibracionais destes corpos. Segundo Rao (2008), os componentes internos de um



maquinário ou até mesmo a sua estrutura pode vir a falhar como resultado da oscilação cíclica inerente ao funcionamento.

Especificamente em máquinas a vibração pode resultar no afrouxamento dos elementos de fixação, tais como porcas e parafusos; e em estruturas o fenômeno da ressonância pode levar ao colapso estrutural da montagem.

Segundo Santos (2019), as propriedades dinâmicas são de fundamental importância para desenvolver projetos nos quais o amortecimento da vibração desempenha papel essencial para o funcionamento da estrutura. O amortecimento das vibrações está intimamente ligado a características intensivas como frequência natural, amortecimento e modos de vibrar, os quais podem ser obtidos através da análise modal.

Dessa maneira, o entendimento e análise dos aspectos vibracionais de um corpo são capazes de influenciar o projeto de máquinas e estruturas de modo a garantir a sua integridade física e custo-benefício de operação. Ainda dentro do espectro beneficiado pelo estudo modal encontra-se o aspecto humano, uma vez que de acordo com Rao (2008) em inúmeros sistemas o ser humano é parte integrante do conjunto, e, portanto, o excesso de vibrações pode ser transmitido ao operador resultando por fim em desconforto físico e mental, ou até mesmo dificuldade na operação e insalubridade.

Considerando a importância do estudo vibracional de estruturas e a necessidade de ensaios modais, surge a necessidade de instrumentos capazes de garantir tais medições. O martelo de impacto é utilizado para realizar ensaios e medições em campo, porém com custo estabelecido na faixa de R\$ 2665,00. Assim, o presente trabalho tem como base de justificativa o valor de construção para o desenvolvimento do projeto, uma vez que este fica próximo de uma média de R\$ 250,00 considerando os materiais e acelerômetro utilizados para a construção.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

Projetar um martelo de impacto com instrumentação de baixo custo para uso em Análise Modal experimental de estruturas.

#### **1.3.2 Específicos**

- Realizar o estudo teórico acerca da Análise Modal abordando os principais parâmetros de vibração que influenciam uma estrutura;

- Desenvolver um martelo de impacto de baixo custo a fim de possibilitar a execução de um ensaio modal análogo a instrumentos comerciais;
- Realizar a Análise Modal em uma estrutura pré-definida tal como indica a literatura de modo a obter os parâmetros vibracionais do corpo;
- Comparar os resultados obtidos utilizando o martelo de impacto desenvolvido frente ao comercial.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho é dividido em cinco capítulos sendo que o primeiro traz uma introdução acerca de problemas associados a vibrações mecânicas trazendo então a formulação do problema, seguindo para os objetivos gerais e específicos do trabalho e por fim a estrutura do texto.

O segundo capítulo faz uma revisão bibliográfica acerca de vibrações mecânicas, discutindo sobre condições forçantes gerais e integral de convolução, seguindo por conceitos que circundam a análise modal e o teste de impacto.

No terceiro capítulo a metodologia para o desenvolvimento do projeto e a realização do experimento foram apresentadas trazendo os materiais e métodos utilizados desde o processo de elaboração dos desenhos CAD até os procedimentos experimentais adotados.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões, em conjunto com a análise dos dados obtidos experimentalmente através de uma comparação entre o que pôde ser obtido utilizando o instrumento de medição comercial e o resultado do martelo de impacto desenvolvido para o presente trabalho.

Finalmente o quinto capítulo abre a discussão quanto as conclusões obtidas através da comparação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Vibrações Mecânicas

Rao (2008) define vibração como “qualquer movimento que se repita dentro de um certo intervalo de tempo” e, teoria de vibração como “estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles”.

Dentro da teoria de vibração são tratados os sistemas vibratórios, os quais segundo Rao (2008) são constituídos por elementos de rigidez, elementos de massa e elementos de amortecimento, respectivamente armazenadores de energia potencial, energia cinética e mecanismo para dissipação de energia. Considerando os elementos constituintes de um sistema vibracional pode-se entender o mecanismo de funcionamento deste como uma transferência alternada de energia potencial para energia cinética e cinética para potencial. Uma vez que todo sistema conta com perdas, a conversão de energia em cada ciclo não será constante, havendo, portanto, dissipação. Logo, se o sistema necessitar manter um regime constante de oscilação será necessário a adição de uma fonte externa de excitação.

Rao (2008) classifica as vibrações como:

- Vibração livre: apenas uma perturbação inicial é impelida ao sistema, o qual segue oscilando sem agentes externos;
- Vibração forçada: um agente externo atua sobre o sistema vibracional;
- Vibração não amortecida: o sistema não conta mecanismos de perda ou dissipação de energia;
- Vibração amortecida: energia é perdida ou dissipada;
- Vibração linear: os componentes do sistema se comportam de forma linear;
- Vibração não linear: os componentes do sistema não se comportam de forma linear;
- Vibração aleatória: a magnitude da oscilação não pode ser prevista, embora a partir de uma quantidade razoável de amostras a análise estatística possa descrever parâmetros regulares.

## 2.2 Resposta à Força Periódica Geral

Rao (2008) demonstra que quando uma força externa  $F(t)$  é periódica com período  $\tau = 2\pi$ , pode-se escrevê-la utilizando a expansão da série de Fourier.

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos j\omega t + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \sin j\omega t \quad (1)$$

Sendo que:

$$a_j = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) \cos j\omega t dt \quad (2)$$

$$b_j = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) \sin j\omega t dt \quad (3)$$

Considerando que a equação de movimento do sistema submetido a essa força pode ser escrita como

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos j\omega t + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \sin j\omega t \quad (4)$$

Pelo princípio da superposição, a solução para a equação de movimento, segundo Rao (2008) se resume a forma:

$$x_p(t) = \frac{a_0}{2k} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_j/k}{\sqrt{(1-j^2r^2)^2 + (2\zeta jr)^2}} \cos j\omega t - \phi_j \\ + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{b_j/k}{\sqrt{(1-j^2r^2)^2 + (2\zeta jr)^2}} \sin j\omega t - \phi_j \quad (5)$$

### 2.2.1 Integral de convolução

Rao (2008) descreve que uma força excitadora não periódica varia com o tempo agindo durante um período especificado e em seguida cessando. A força de impulso é “uma força que tem uma grande magnitude  $F$  e age durante um período muito curto  $\Delta t$ ” (Rao, 2008).

$$\text{Impulso} = F\Delta t = m\dot{x} - m\dot{x}_1 \quad (6)$$

$$F_{\sim} = \int_t^{t+\Delta t} F dt \quad (7)$$

### 2.2.2 Resposta a um impulso

Rao (2008) apresenta a formulação matemática para o caso de um sistema massa-mola viscosamente amortecido sujeito a um impulso unitário em  $t = 0$  conforme pode ser visto na Figura 1.

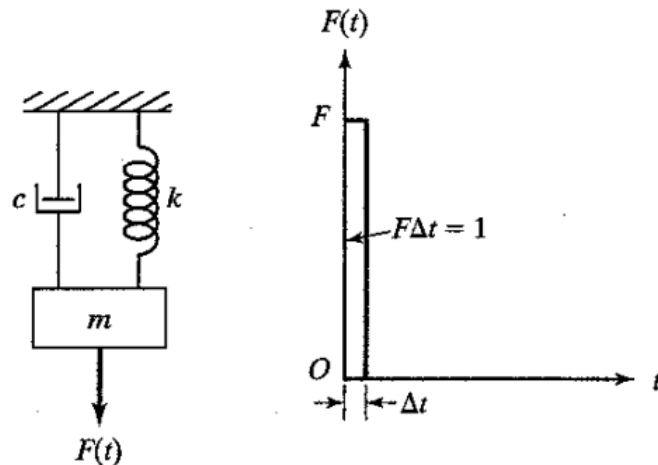


Figura 1 - Sistema com um grau de liberdade sujeito a um impulso  
Fonte: Rao (2008).

Em particular para um sistema subamortecido conforme a Figura 1, tem-se a solução da equação de movimento expressa por:

$$x(t) = e_n^{-\zeta\omega_n t} \left\{ x_0 \cos \omega_d t + \frac{\dot{x} + \zeta\omega_n x_0}{\omega_n} \sin \omega_d t \right\} \quad (8)$$

Sendo que:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (9)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (10)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11)$$

### 2.2.3 Resposta a uma condição forçante geral

Uma ferramenta para descrever a resposta de um sistema subamortecido com um grau de liberdade sob ação de uma excitação variável no tempo é dada pela integral de *Duhamel*, tal expressão possui uma forma que permite uma integração explícita ou caso essa abordagem não seja possível ela pode ser avaliada por métodos numéricos sem muita dificuldade (Rao, 2008).

$$x(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t F(\tau) e^{\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_d(t - \tau) dt \quad (12)$$

## **2.3 Análise Modal**

A análise modal destina-se a estudar as propriedades dinâmicas de um sistema através das excitações causadas por vibrações. Segundo Forner (2019) a análise modal é o mecanismo de estudo de um sistema ou estrutura a partir dos parâmetros modais (fator de amortecimento, frequências naturais e modos de vibrar).

Leme (2014) afirma que no estudo das vibrações mecânicas de um sistema é importante ter conhecimento acerca do comportamento da estrutura e de seus componentes. As características associadas ao comportamento dinâmico são obtidas a partir da Função Resposta em Frequência (FRF), a qual descreve o comportamento do sistema como uma função de frequência entre dois pontos da estrutura.

### **2.3.1 Formas Modais**

A respeito dos modos de vibrar Schwarz (1999) afirma que os modos são propriedades intrínsecas à estrutura determinadas em função da massa, rigidez, amortecimento e condições de contorno as quais o sistema está submetido. Cada modo é definido por uma frequência natural, um fator de amortecimento e um modo de vibrar.

Leme (2014) associa alguns problemas vibracionais à excitação de um ou mais modos de vibrar de um corpo. As excitações causadas a uma máquina ou estrutura próximos a uma frequência natural, de acordo com Schwarz (1999), tem uma tendência a ser dominada pela forma daquele modo.

Schwarz (1999) traz ainda que os modos podem ser descritos como modos de corpos rígidos ou flexíveis, sendo que se a estrutura estiver oscilando sobre molas suaves a aproximação para um modo de corpo rígido é aceitável. Toda e qualquer estrutura pode ter seis modos de corpo rígido, sendo três de translação e três de rotação.

As formas de vibrar de um corpo podem ser observadas na Figura 2, Figura 3 e Figura 4. Referentes à análise modal computacional de uma chave de boca.

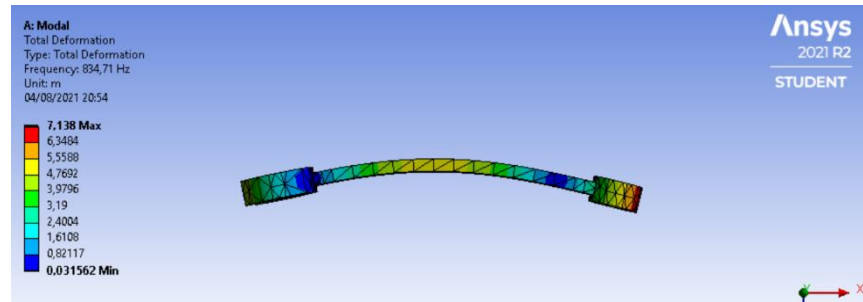


Figura 2 – Primeiro modo de vibração de uma chave de boca  
 Fonte: Pesquisa direta (2021).

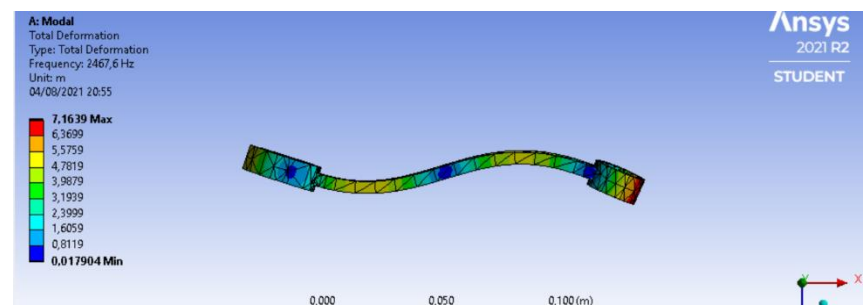


Figura 3 – Segundo modo de vibração de uma chave de boca  
 Fonte: Pesquisa direta (2021).

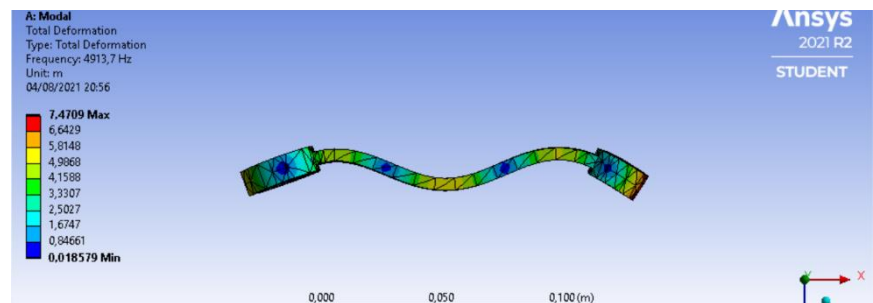


Figura 4 – Terceiro modo de vibração de uma chave de boca  
 Fonte: Pesquisa direta (2021).

As figuras indicam a diferença no modo de vibrar em cada modo. Respectivamente temos o primeiro modo, segundo modo e terceiro modo de vibrar para o corpo em estudo.

### 2.3.2 Função Resposta em Frequência

De acordo com Forner (2019) a FRF relaciona a amplitude da resposta que o sistema apresenta à força que age sobre ele segundo a equação 13.



$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (13)$$

Schwarz (1999) afirma que a Função Resposta em Frequência é a medida do quanto se desloca, se move ou acelera um grau de liberdade de uma estrutura como resposta a uma unidade de força aplicada.

A FRF, segundo Neto (2016), permite que sejam determinadas as frequências naturais de ressonância de um dado sistema. Cada frequência natural do objeto de estudo corresponde a um pico do gráfico obtido e está associada a um modo de vibrar, uma vez que nestas frequências a resposta do sistema é ampliada em relação à excitação.

Neto (2016) aponta ainda que cada modo de vibrar apresenta uma fase diferente do anterior, dessa forma é comum identificar vales acentuados, denominados antirressonância, entre os picos obtidos na FRF. Essa característica é devido a diferença entre as fases de cada modo.

Os diferentes modos de vibrar existentes para uma dada estrutura podem apresentar sérios riscos para o funcionamento do sistema e para a sua integridade estrutural. Schwarz (1999) ilustra que um modo pode fazer uma estrutura funcionar como um amplificador mecânico, ou seja, para certos valores de frequência natural uma pequena excitação pode causar grandes amplitudes de resposta, em contraponto se a excitação ocorrer próximo a um valor de antirressonância a resposta será muito pequena como mostrado na Figura 5.

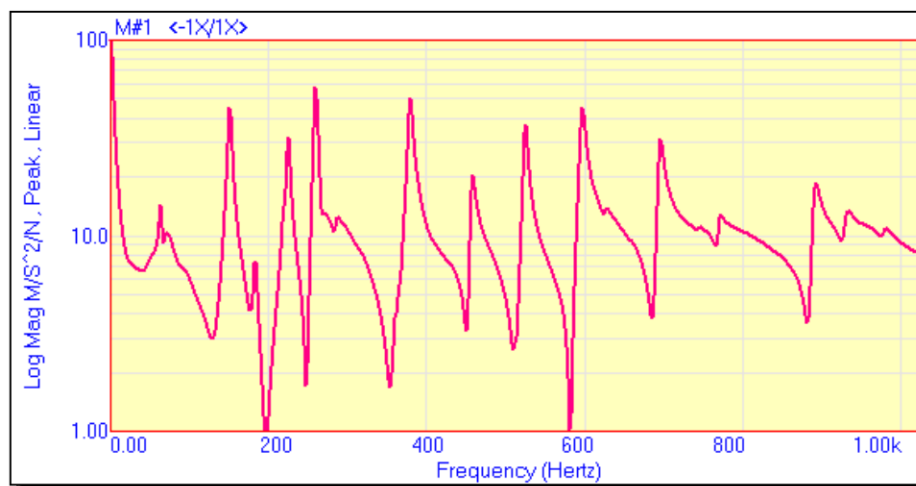


Figura 5 – Função Resposta em Frequência  
Fonte: Schwarz (1999).

A Figura 5 ilustra a grande magnitude causada por valores específicos de frequência natural e o efeito da antirressonância ocasionado pelo cancelamento de fases entre uma frequência e outra.

### 2.3.3 Técnica da Meia Potência

Pode-se determinar o amortecimento modal para um dado pico referente a uma frequência natural utilizando pontos de meia-potência conforme afirma Rao (2008).

Rao (2008) mostra que o amortecimento modal pode ser determinado através da equação 14.

$$\zeta_j = \frac{\omega_j^{(2)} - \omega_j^{(1)}}{2\omega_j} \quad (14)$$

Sendo que  $\omega_j^{(1)}$  e  $\omega_j^{(2)}$  são conhecidos como pontos de meia potência, e estão localizados nos pontos que tem a solução da equação 15 como ordenada.

$$\left| H(i\omega_j^{(1)}) \right| = \left| H(i\omega_j^{(2)}) \right| = \frac{|H(i\omega_j)|}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

As frequências de meia banda localizadas conforme disposto na equação 14 podem ser visualizadas na Figura 6.

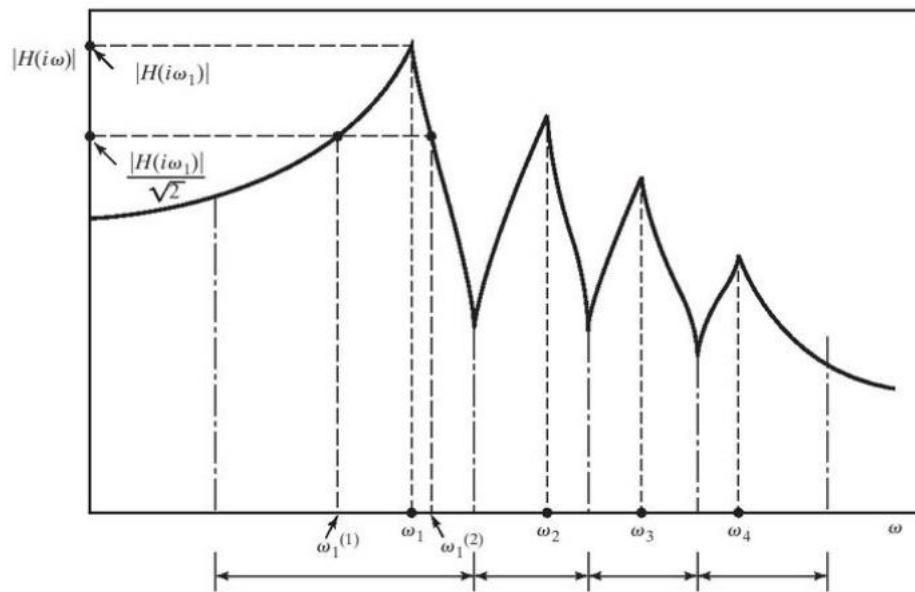


Figura 6 - Função resposta em frequência genérico contendo frequências de meia banda  
Fonte: Rao (2008).

A Figura 6 ilustra um gráfico típico de função resposta em frequência, contendo alguns picos que indicam a presença de frequências naturais. Para um dos picos é utilizada a equação 15 a fim de identificar as duas frequências correspondentes a largura de meia banda.

### 2.3.4 Função coerência

Uma vez que a análise modal experimental é realizada utilizando-se sinais deve-se existir um método para avaliar a qualidade deste sinal, ou seja, a quantidade de ruído presente no sinal, segundo Rao (2008).

$$\beta(\omega) = \frac{S_{fx}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \times \frac{S_{xf}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} = \frac{|S_{xf}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{ff}(\omega)} \quad (16)$$

Rao (2008) traz ainda que se as medições forem ruídos puros, então  $\beta = 0$ , e que se não houver ruído algum será  $\beta = 1$ . Próximo de uma frequência natural, normalmente,  $\beta \approx 1$ , uma vez que os sinais são grandes e menos influenciados pelos ruídos, conforme pode ser visto na Figura 7

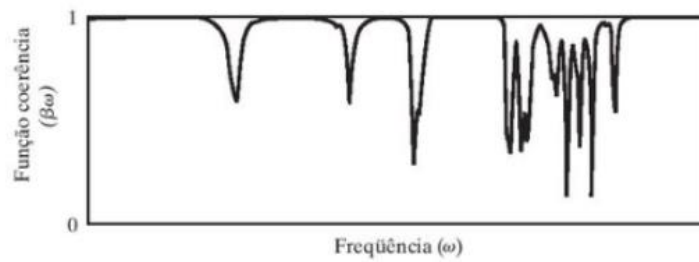


Figura 7 - Função coerência  
Fonte: Rao (2008).

### 2.3.5 Teste de impacto

Segundo Schmidt (2013) todo sinal periódico pode ser representado pela soma da série de Fourier a qual através de tratamento adequado é possível obter uma representação para sinais com duração finita. Tal representação é conhecida como Transformada Discreta de Fourier e o algoritmo construído para sua utilização é denominado Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Schwarz (1999) relata que o avanço computacional permitiu computar FRF a partir de FFT possibilitando o desenvolvimento de uma técnica de análise modal conhecida como teste de impacto. Esse teste se tornou o mais popular mecanismo de análise modal devido a sua rapidez, conveniência e baixo custo. A Figura 8 ilustra os principais participantes de um teste de impacto.

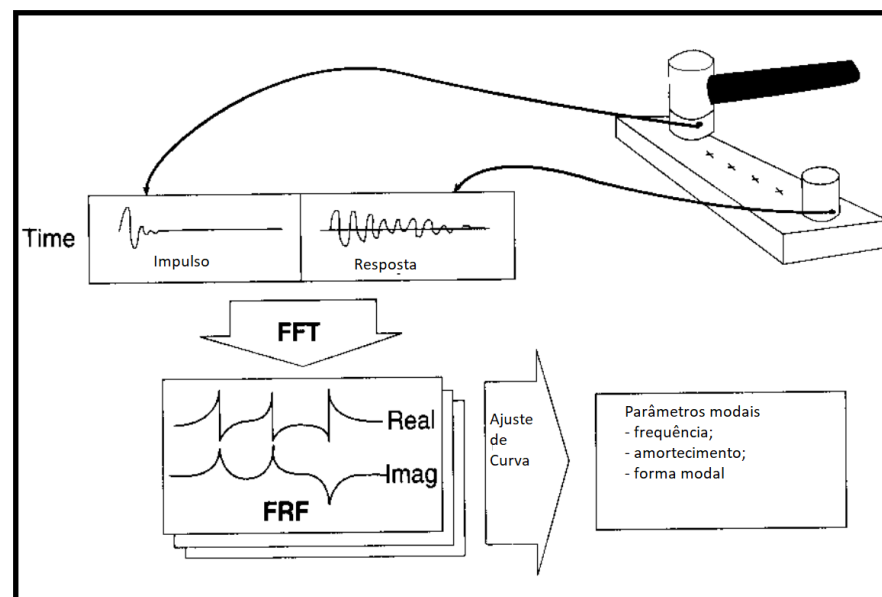


Figura 8 – Teste de impacto  
Fonte: adaptado de Schwarz (1999).

O teste de impacto, conforme a Figura 8, exemplifica os componentes, equipamentos e processos necessários para se realizar o teste de impacto, são eles:

- Martelo de impacto capaz de mensurar a força aplicada;
- Acelerometro para mensurar a resposta em termos de aceleração;
- Analisador de FFT;
- Software de pós-processamento específico para identificar os modos.

Considerando a importância de um estudo acerca de parâmetros modais e os problemas circundantes do teste de impacto, controlou-se todos os requisitos mínimos para a realização deste tipo de experimento. Schwarz (1999) salienta, por exemplo, que embora o teste de impacto seja extremamente eficaz e conveniente, alguns cuidados devem ser tomados para que os resultados sejam verossímeis, entre eles podemos destacar o *pre-trigger delay*, janelamento exponencial e capacidade de aceitar ou rejeitar a medição. Associando tais cuidados com os instrumentos e procedimentos necessários levantados também por Schwarz é possível desenvolver um equipamento capaz de realizar as medições.

### **2.3.6 Martelos de Impacto**

O martelo de impacto é o principal componente dentro do teste de impacto, sendo comercializado em diferentes dimensões.

De uma maneira geral esses instrumentos são projetados e fabricados para suportar ambientes difíceis com poeira, umidade e flutuações de temperatura. Os martelos comerciais contemplam ainda ponteiras fabricadas em diferentes materiais para se adequar ao uso a depender da estrutura a ser analisada. Na Figura 9 pode-se ver o martelo *B&K Tipo 8206* e suas diferentes ponteiras.



Figura 9 - Martelo de impacto *B&K Tipo 8206*

Fonte: Pesquisa direta (2022).

É possível identificar na Figura 9 o martelo e suas diferentes ponteira, feitas em metal, nylon e borracha. Além do martelo e as ponteiros também está presente um peso extra, o qual tem função de variar a massa possibilitando se adequar à diferentes tipos de estruturas.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo os meios para obter-se os objetivos da pesquisa são apresentados. O conteúdo desta seção engloba o tipo de pesquisa, os materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados, tabulação dos dados e considerações finais.

#### 3.1 Tipo de Pesquisa

Segundo Pronadov e Freitas (2013) a finalidade da pesquisa é descobrir respostas para um problema formulado e o mecanismo para obtenção desta resposta é o método científico. A pesquisa científica, ainda de acordo com Pronadov e Freitas (2013) é a “realização de um estudo planejado, sendo o método de abordagem do problema o que caracteriza o aspecto científico da investigação”. Dessa forma a pesquisa apresenta diversas classificações e etapas de modo a configurar o trabalho dentro de padrões e parâmetros passíveis de reprodução por outro pesquisador.

A pesquisa pode ser classificada quanto a abordagem, objetivos e procedimentos técnicos.

Para Pronadov e Freitas (2013) a pesquisa quanto a abordagem se divide entre qualitativa e quantitativa, sendo a primeira uma abordagem para problemas indissociáveis entre si que não podem ser traduzidos em números, ou seja, não requer o uso de técnicas estatísticas para a sua análise, criando assim uma tendência ao pesquisador de correlacionar os seus dados indutivamente. Em contraponto Pronadov e Freitas (2013) afirmam que a pesquisa quantitativa considera que “tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las”.

A respeito dos objetivos a classificação se divide em três variedades: descritiva, explicativa e exploratória. Pronadov e Freitas (2013) afirmam que para uma pesquisa se encaixar na classificação descritiva ela deve apenas descrever e observar fatos sem interferência em seu resultado. Marconi e Lakatos (2003) consideram que a pesquisa explicativa é aquela que observa um fenômeno através da relação entre causa e efeito das variáveis envolvidas. Por fim, Gil (2002) afirma que a pesquisa quando exploratória tem como função deixar o tópico ou problema mais claro e familiar de modo a facilitar a formulação de novas hipóteses para pesquisas subsequentes.

Os procedimentos técnicos variam de acordo com o método empregado para obtenção dos dados, podendo ser realizado através de questionários, observação, bibliografia, documental, experimental e entrevistas.

A classificação deste presente trabalho pode ser avaliada como quantitativa, quanto a abordagem, uma vez que serão realizados experimentos a fim de obter resultados semelhantes ao que pode ser obtido via instrumentos comerciais, descritiva quanto ao objetivo, considerando que o objeto de estudo e sua utilização serão analisados minuciosamente e por fim experimental e bibliográfica quanto ao procedimento técnico devido ao embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho associado a necessidade de experimentação.

### **3.2 Materiais e Métodos**

O local utilizado para realizar as medições do trabalho foi o laboratório Lavisi da Escola de Minas. Os materiais utilizados foram:

- Martelo de impacto *Brüel & Kjaer Tipo 8206*;
- Acelerômetro *PCB Piezoelectronics* modelo 352C33;
- Módulo de entrada de tensão *National Instruments NI-9239*;
- Impressora 3D Dextralab modelo DX3;
- Filamento em PETG;
- Acelerômetro ADXL335;
- Grampo tipo C;
- Barra de aço SAE 1020;
- Corpo de prova aço SAE 1020 de 1817,1 g;
- Parafuso Sextavado MA 5 X 16 Classe 8.8 Aço Polido;
- Barra Roscada MA 5 X 0.80 X 30 Aço Carbono Polido;
- Porca Sextavada MA 5 - 0.80 Chave 8 Aço Classe 8.8;
- Arruela lisa M5 zincada;
- Pino Guia 5 X 20 Aço Liga Retificado.



A fim de desenvolver um martelo de impacto de baixo custo capaz de ser utilizado para se obter parâmetros modais experimentalmente, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica acerca de vibrações mecânicas, respostas sob condições forçantes gerais, análise modal e teste de impacto.

### 3.2.1 Projeto do martelo

Após a revisão bibliográfica iniciou-se o desenho do martelo utilizando o software *Solidworks*. Considerando as dimensões dos martelos comerciais disponíveis no mercado o projeto do martelo a ser desenvolvido no presente trabalho teve de ser desenhado em módulos separados: cabo, cabeça e pontas devido à direção das fibras no processo de manufatura aditiva. O projeto feito de maneira inteiriça forçaria que toda a extensão do martelo fosse feita com uma mesma orientação de fibras podendo prejudicar a cabeça durante impactos.

Para que o cabo e a cabeça do martelo pudessem ser acoplados de maneira a manter a rigidez do objeto foi criado um encaixe macho-fêmea com folga. Como pode ser observado na Figura 10 e Figura 11.

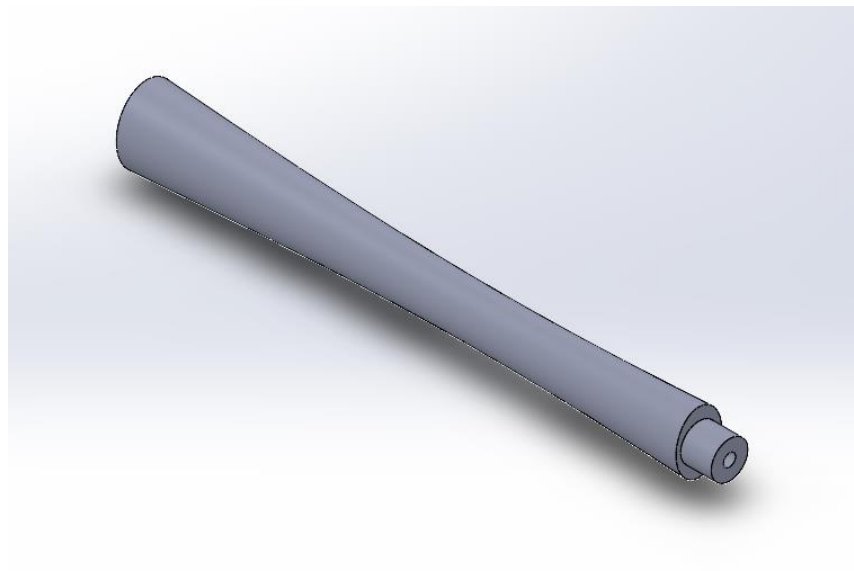


Figura 10: Cabo do martelo  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

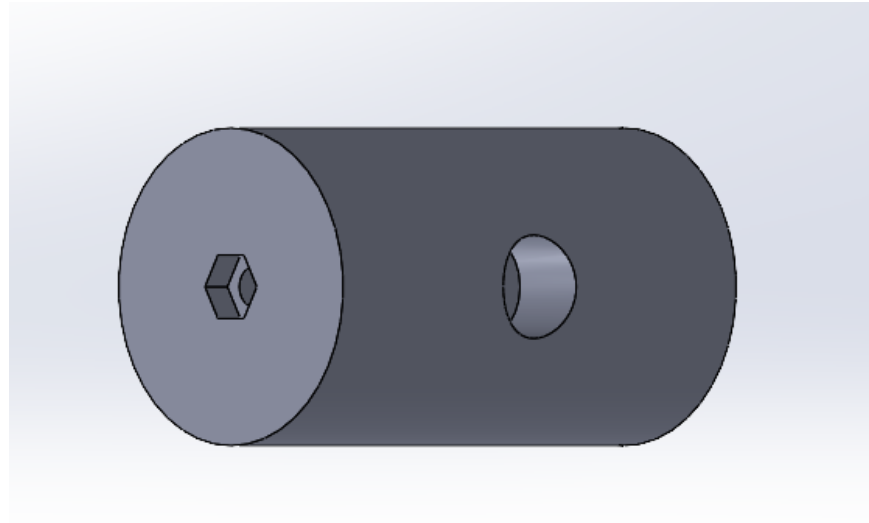


Figura 11 - Parte inferior da cabeça do martelo  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Considerando o encaixe projetado entre a cabeça e o cabo conforme pode-se observar nas figuras, a fim de garantir o acoplamento sem que ocorram desalinhamentos foi utilizado cola epóxi para que os componentes ficassem devidamente fixos.

Considerando também que o acelerômetro ADXL335, componente responsável pela aquisição dos dados, deve ser fixado na cabeça do martelo, um canal de 4 mm para a passagem dos fios responsáveis pela alimentação e aquisição dos sinais foi incorporado à parte interna tanto do cabo quanto da cabeça, conforme pode ser visto na Figura 12.

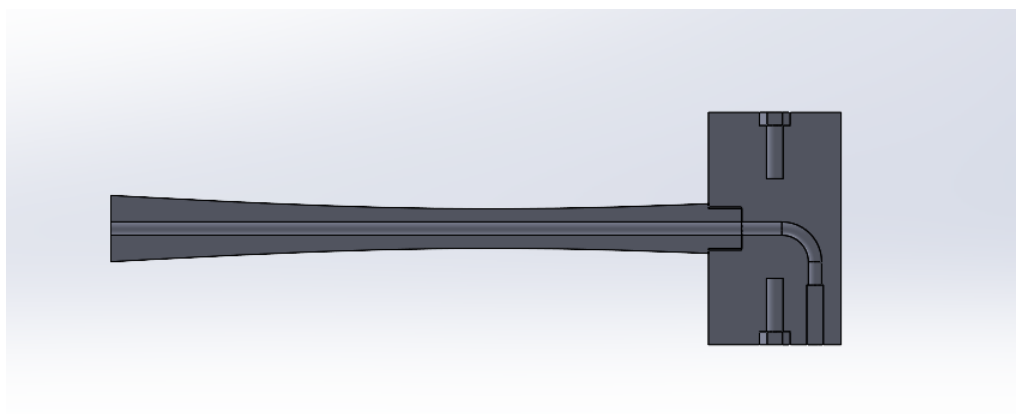


Figura 12 - Seção média da montagem do martelo  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 12 mostra o corte da seção média do martelo evidenciando o canal para a passagem dos fios. A cavidade passa por toda a extensão longitudinal do cabo e continua pela

cabeça até a localização final do sensor. Uma vez que o ponto de fixação do acelerômetro e a linha central do cabo forma um ângulo reto, foi desenhado uma curva de raio 10 mm a fim de facilitar a passagem dos fios posteriormente a montagem.

As dimensões gerais do martelo podem ser vistas na Figura 13.

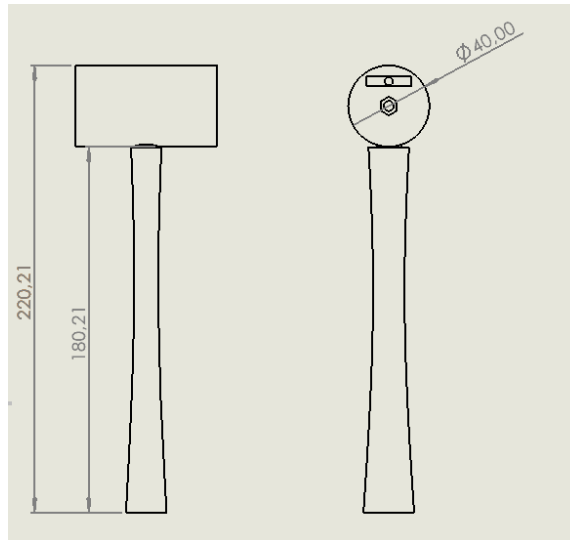


Figura 13 - Dimensões gerais do martelo  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Considerando que os martelos comerciais possuem diferentes pontas para se adaptar a cada situação a depender do material a ser mensurado, foi desenhado para o presente trabalho duas opções diferentes de pontas: uma em aço e outra em PETG. As pontas foram projetadas para serem fixadas através de um parafuso M5 x 0,80, dessa forma na base de cada uma delas foi feito um corte em formato hexagonal para o encaixe do parafuso por interferência, como pode ser observado na Figura 14 e Figura 15.

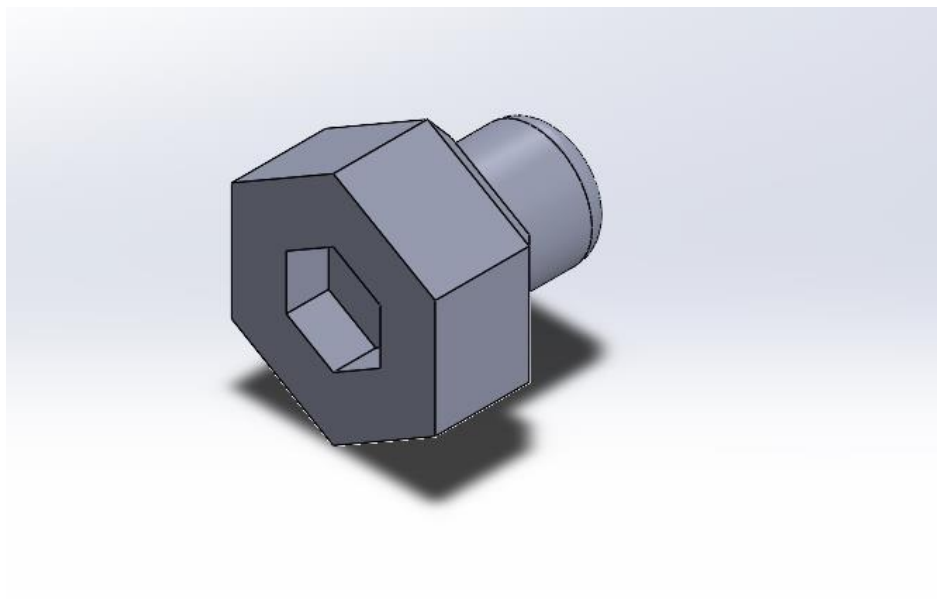


Figura 14 - Ponta feita em PETG  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

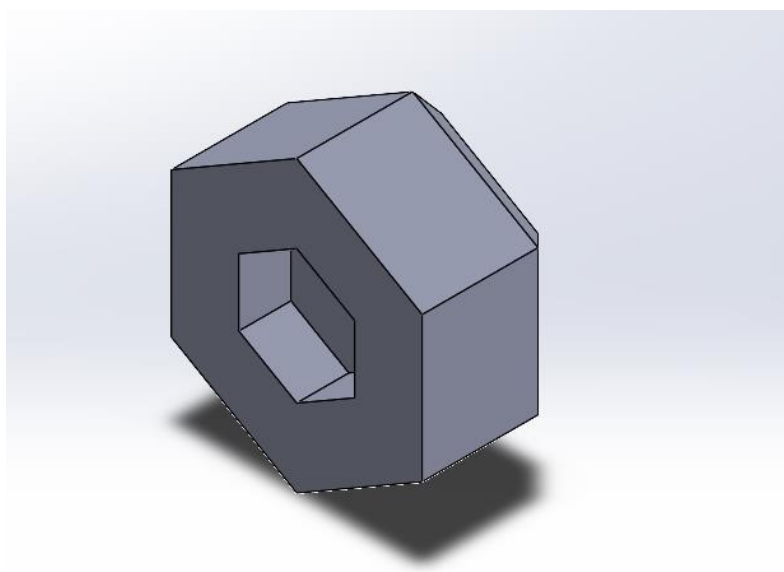


Figura 15 - Ponta de aço  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

O corte hexagonal possui as dimensões apropriadas para que a cabeça do parafuso M5 x 0,80 seja fixado de tal maneira que a espessura da cabeça seja inteiramente introduzida no corte.

Uma vez que as pontas contarão com parafusos acoplados foi necessário também recriar os cortes hexagonais na cabeça a fim de emparelhar uma porca condizente com o passo

da rosca do parafuso, conforme pode ser visto na Figura 15. Além de recriar o corte, também foi necessário desenhar um canal para que a extensão do parafuso pudesse correr sem resistência na parte interna da cabeça do martelo.

Além das pontas feitas de materiais diferentes, os martelos comerciais contam também com a possibilidade de aumento de massa. Dessa forma foi projetado um cilindro com um furo central como visto na Figura 16.

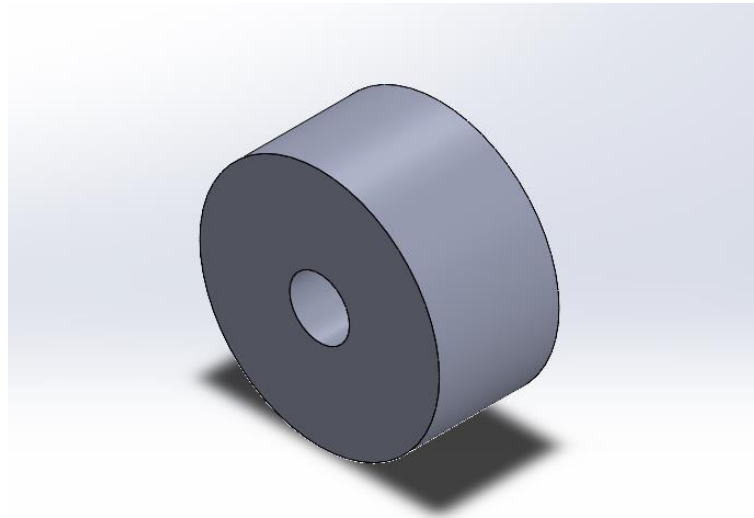


Figura 16 - Peso extra  
Fonte: pesquisa direta (2023).

A Figura 16 mostra o cilindro utilizado para funcionar como o peso extra. Considerando que o material utilizado na impressão não apresenta uma grande densidade foi necessário criar um furo compatível com uma barra roscada M5 x 0,80 a qual contara com porcas com o intuito de agregar massa ao sistema.

### **3.2.2 Descrição da montagem do martelo**

Uma vez que o martelo será impresso em módulos, surge a necessidade de realizar a sua montagem.

O cabo e a cabeça serão associados por uma ligação macho-fêmea, e para garantir a fixação é adicionado uma certa quantidade de cola epóxi para garantir a rigidez do sistema.

Ainda na cabeça do martelo serão adicionadas porcas M5 nos encaixes destinados a esses elementos, os quais são fixados por interferência.

Cada uma das pontas possui um corte hexagonal destinado a um parafuso M5, o qual será acoplado também por interferência.

O módulo destinado ao peso extra é montado utilizando a barra rosca M5 presa através de porcas. São adicionadas também arruelas para aumentar a massa.

Por fim, o sensor é acoplado à parte superior da cabeça e os fios são passados pelo canal interno, conforme Figura 17 e Figura 18.



Figura 17 - Martelo montado vista superior.  
Fonte: Pesquisa direta (2022).



Figura 18 - Martelo montado visão do sensor.  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

### 3.2.3 Descrição da metodologia da calibração

Considerando que o martelo de impacto desenvolvido será utilizado como ferramenta de obtenção de dados de parâmetros físicos é necessário realizar a sua calibração.

Utilizando um corpo de prova de massa conhecida é feito um ensaio de impacto conforme a montagem da Figura 19 a fim de obter a aceleração empregada na amostra. Uma vez que a amostra escolhida possui massa conhecida utilizando o sinal obtido pelo acelerômetro nela posicionada, é possível calcular a força empregada através da Segunda Lei de Newton e dessa forma incluir um fator de correção para nas medições do acelerômetro presente no martelo para que o software utilizado reconheça o valor da força que o martelo aplica.

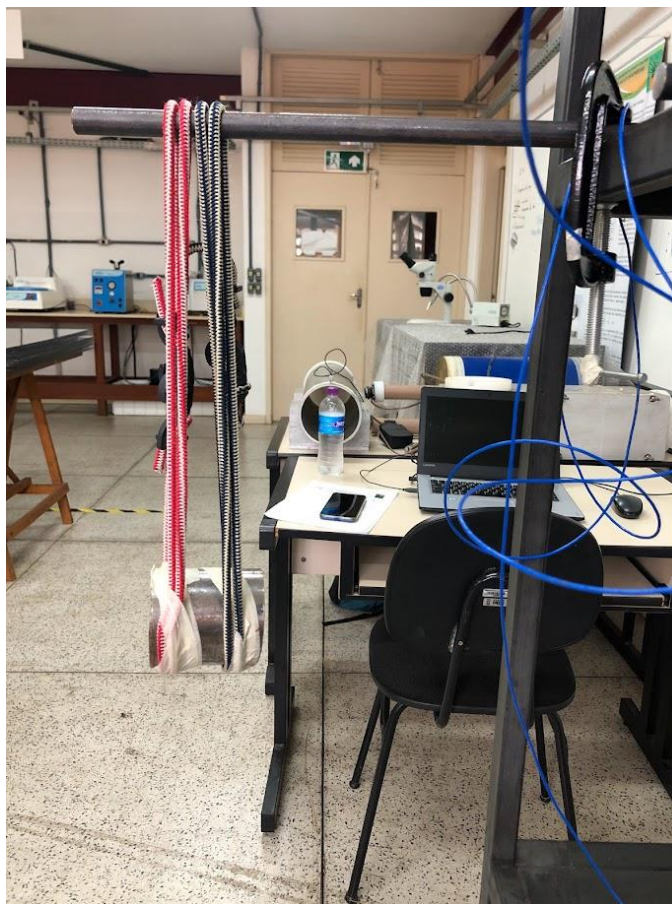


Figura 19 - Montagem realizada na calibração  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

A montagem realizada para a calibração do martelo consiste em um tarugo de massa 1817,1 g suspenso por dois elásticos presos a uma barra engastada simulando uma estrutura livre-livre. O impacto gerado pelo martelo é mensurado através de um acelerômetro presente no tarugo.

A fim de garantir que os valores obtidos estão corretos o mesmo teste foi também realizado como martelo comercial *Tipo 8206* da empresa *Briuel & Kjaer* utilizando a mesma montagem como visto na Figura 20 para posteriormente comparar os resultados e garantir que a calibração está condizente com a realidade.





Figura 20 - Montagem da calibração utilizando o martelo comercial  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

O teste realizado com o martelo é utilizado como referência para a calibração do martelo desenvolvido para o presente trabalho. Uma vez que o martelo da *Tipo 8206* possui um certificado de calibração já existente e válido e a massa do corpo de prova é conhecido é possível garantir que os parâmetros do martelo projetado para o trabalho atendam os requisitos necessário para prosseguir com os experimentos.

O procedimento de calibração utiliza a FRF gerada através do impacto usando o martelo comercial (Figura 21) para determinar a massa do corpo utilizado no procedimento.

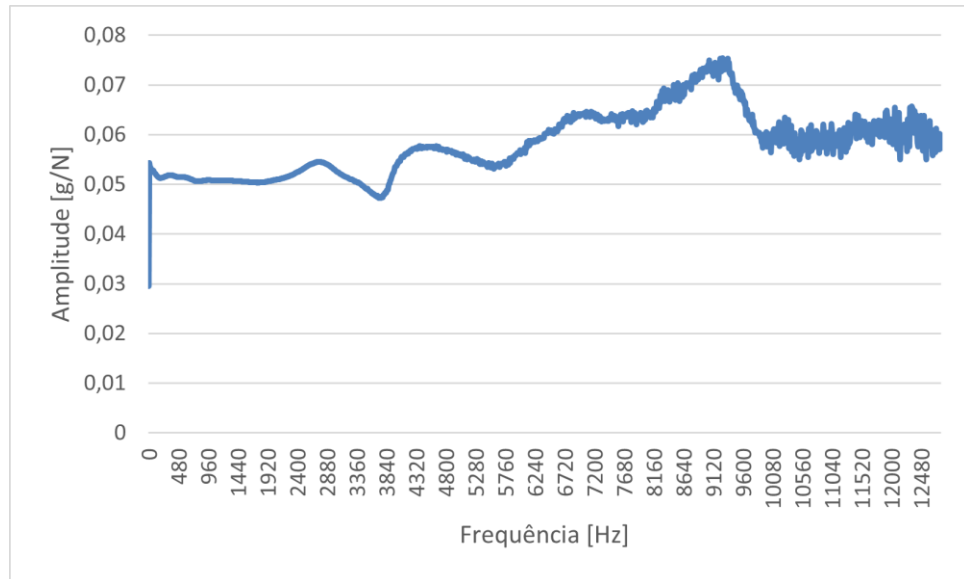


Figura 21 - FRF gerada na calibração usando o martelo *B&K Tipo 8206*  
 Fonte: Pesquisa direta (2023).

A FRF gerada utilizando como referência o martelo comercial, conforme a Figura 21, é utilizada para identificar no gráfico uma região plana a fim de obter uma média de valores para a amplitude.

O valor inverso da média calculada será aproximadamente igual ao valor da massa do corpo submetido ao teste, uma vez que:

$$\frac{g}{N} \Rightarrow 9,81 \frac{m}{s^2} \frac{1}{kg \frac{m}{s^2}} \Rightarrow \frac{9,81}{kg} \quad (17)$$

O procedimento de calibração para o martelo protótipo consiste em gerar a FRF resultante do impacto (Figura 22) e em seguida determinar o fator de correção para que a medição entregue o mesmo valor de massa e consequentemente o mesmo valor de força utilizando o mesmo procedimento do martelo comercial.

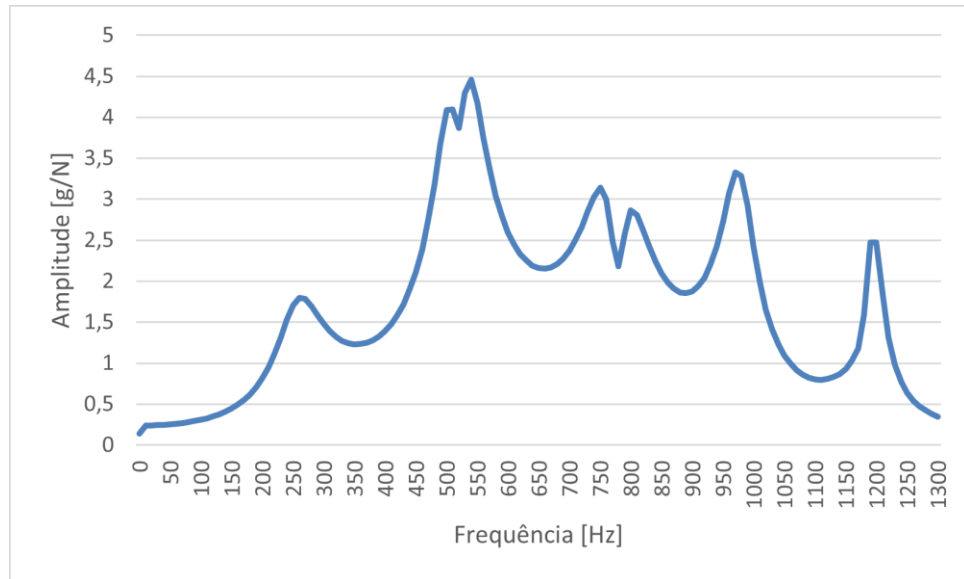


Figura 22 - FRF gerada na calibração usando o martelo protótipo  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A FRF gerada através do impacto utilizando o martelo de impacto de baixo custo pode ser vista na Figura 22. O procedimento fundamenta-se em tirar a média da amplitude em uma faixa aproximadamente constante do gráfico para prosseguir com o valor de correção afim de determinar a massa do corpo mensurado.

Tabela 1 - Tabela de calibração

Martelo	Média da amplitude [g/N]	Fator de correção	Massa [kg]
Martelo B&K	0,05108	1	1,9977
Martelo protótipo	0,2472	4,82	1,9876

Fonte: Pesquisa direta (2023).

### 3.2.4 Descrição da metodologia da medição

A fim de garantir que o martelo de impacto desenvolvido para o presente trabalho é capaz de efetuar um ensaio de impacto e entregar medições passíveis de serem utilizadas para determinar parâmetros modais foi selecionada uma barra de aço SAE 1020. A estrutura em questão foi suspensa por elásticos de modo a garantir que pudesse ser modelada como uma viga livre-livre.

O procedimento consiste em realizar inicialmente o experimento utilizando o martelo comercial *Brüel & Kjør Tipo 8206* da seguinte maneira: um ponto inicial é escolhido para

posicionar o acelerômetro *PCB Piezoelectronics 352C33* e três impactos são feitos neste mesmo ponto. Os dados são coletados através de um software que realiza a FRF do ponto em questão conforme Figura 23.

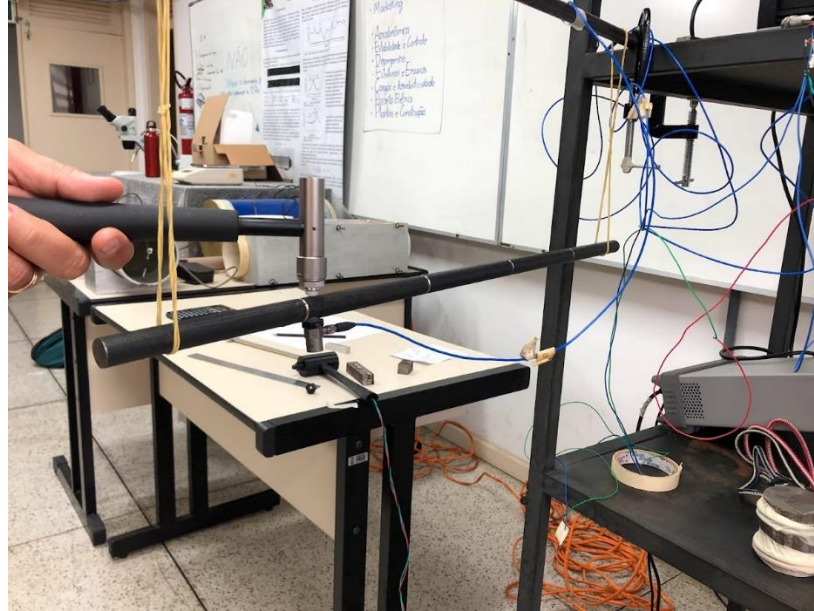


Figura 23 - Medição da FRF em um ponto  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

A medição do primeiro ponto é denominada FRF de ponto. Considerando que a estrutura em questão é feita de aço foi escolhida a ponta comercial feita de nylon para realizar o ensaio.

Em sequência a posição do acelerômetro é mantida fixa enquanto o ponto de impacto é alterado (Figura 24). A medição variando a posição do martelo é denominada FRF de transferência.

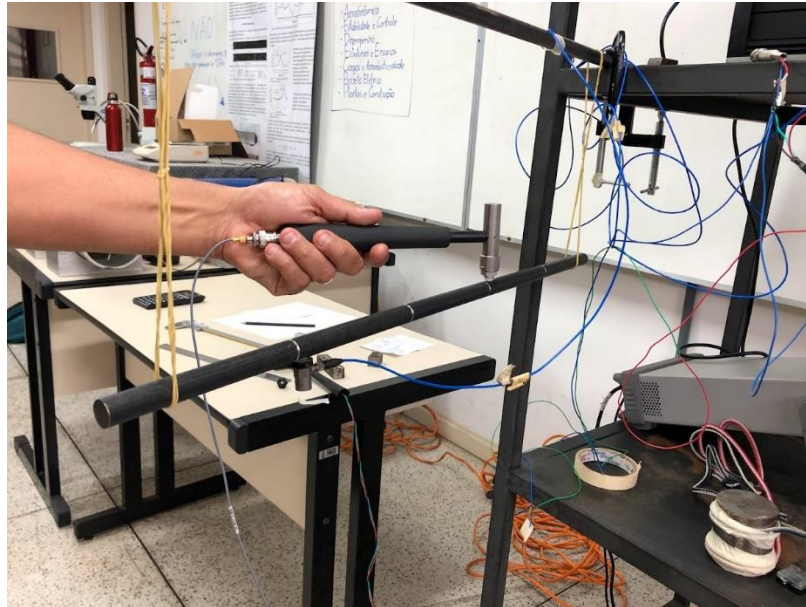


Figura 24 - Teste de impacto FRF de transferência  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

A partir da coleta de dados utilizando a técnica de alterar a posição de impacto, conforme a Figura 24, uma segunda FRF é criada e os dados gerados são armazenados em uma planilha.

A segunda parte do experimento consiste em realizar o mesmo procedimento aplicado para o martelo comercial, porém agora utilizando o martelo em desenvolvimento. A fim de garantir que os dados gerados são replicáveis e comparáveis foi utilizada a mesma montagem e os mesmos pontos de impacto.

Considerando que para a estrutura em questão foi utilizado a ponta de nylon no martelo *Tipo 8206* foi escolhida a ponta de PETG para o martelo experimental.

Os três primeiros impactos foram realizados no ponto próximo ao acelerômetro 352C33 conforme Figura 25.





Figura 25 - Teste de impacto inicial para o martelo em desenvolvimento  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

Os três primeiros impactos realizados no ponto indicado na Figura 25 são coletados pelo acelerômetro presente no martelo e o software faz a FRF. Os dados gerados são armazenados em forma de planilha.

Analogamente à primeira etapa realizada com o *Tipo 8206* é feita mais uma medição alterando a posição de impacto, realizando-a no mesmo ponto aplicado pelo martelo comercial, como visto na Figura 26.

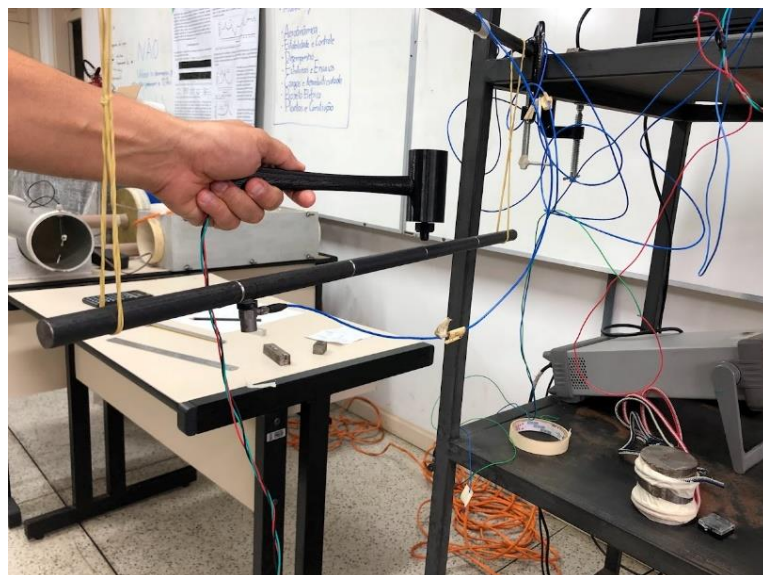


Figura 26 - Teste de impacto FRF de transferência com o martelo protótipo  
Fonte: Pesquisa direta (2022).

Analogamente aos passos anteriores, os três impactos aplicados no ponto de transferência (Figura 26) são coletados e é gerada uma FRF da medição. Os dados resultantes são igualmente armazenados em forma de planilha para posterior tabulação e análise.

### 3.3 Variáveis e Indicadores

Podemos entender uma variável como um valor discernível e passível de mensuração, segundo Fernandes (2018).

Já os indicadores da variável, segundo Moraes (2021) são os elementos práticos que possibilitarão a quantificação da variável.

O martelo de impacto desenvolvido no presente trabalho necessita obter dados de saída de maneira semelhante a um martelo comercializado no mercado e utilizado como referência. Dessa forma considerando que um martelo de impacto é utilizado para realizar a análise modal de um sistema ou estrutura é razoável concluir que as variáveis e indicadores deste trabalho sejam aquelas obtidas pelo ferramental de referência como disposto na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Frequência natural	Rigidez Massa Amortecimento

Fonte: Pesquisa direta (2022).

### 3.4 Instrumentos de Coleta de Dados

O sinal gerado pelo impacto tanto do martelo *Tipo 8206* quanto do martelo desenvolvido para o presente trabalho são recebidos pelo módulo de entrada de tensão Nacional Instruments NI-9239, o qual envia os sinais para o software *Labview*.

O software plota a FRF da medição em cada um dos casos e os transforma em uma base de dados.

### **3.5 Tabulação dos Dados**

As FRFs obtidas a partir das medições realizadas foram transformadas em uma planilha a fim de ser tratada no software *Microsoft Excel*. Após a coleta, tratamento e visualização de dados a discussão acerca destes será realizada no *Microsoft Word*.

### **3.6 Considerações Finais do Capítulo**

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada para fundamentar o desenvolvimento do tema proposto. Dessa forma foram apresentados os equipamentos, softwares, e etapas de coleta e análise de dados para atacar o problema proposto. Os resultados provenientes da metodologia apresentada serão apresentados no capítulo subsequente.



## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da sequência experimental demonstrada anteriormente, com enfoque em comparar as frequências naturais e amortecimento modal obtidos através do martelo de impacto comercial *B&K Tipo 8206* e o protótipo desenvolvido para o presente trabalho.

### 4.1 Martelo de Impacto

O martelo de impacto projetado e fabricado para o presente trabalho foi montado conforme detalhado na metodologia e pode ser visto na Figura 27.

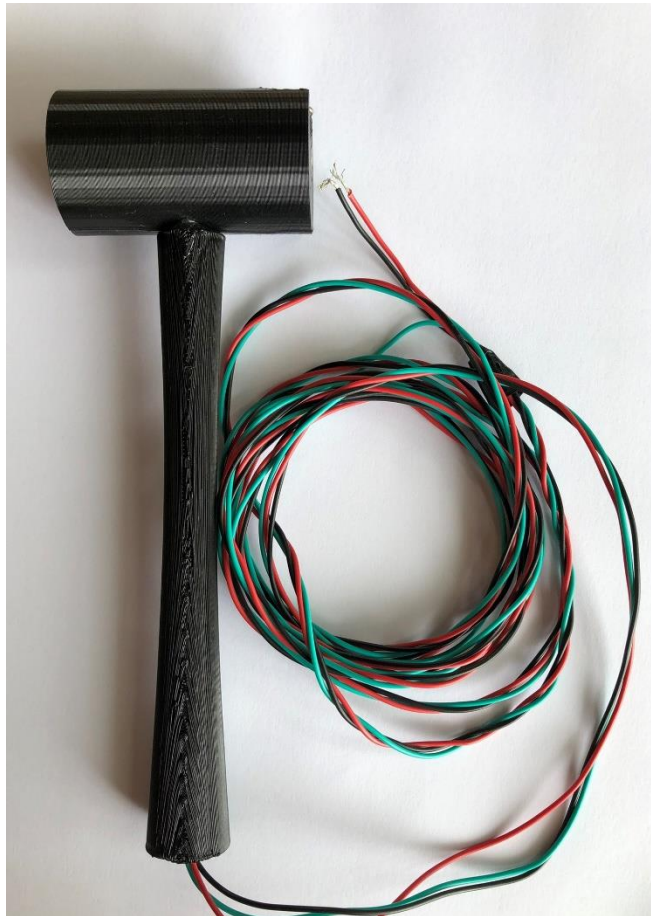


Figura 27 - Martelo de impacto  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 27 mostra o cabo e cabeça do martelo unidos por interferência. É visível também o cabeamento do sensor localizado no compartimento para ele destinado.

Além do martelo propriamente dito, também são partes do projeto duas ponteiros e uma massa extra, conforme a Figura 28.



Figura 28 - Martelo de impacto, ponteiras e peso extra  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 28 contempla todos os componentes de projeto: as duas ponteiras, uma em PETG e a outra em aço carbono, um peso extra e o martelo propriamente dito.

A montagem completa do instrumento, agregando uma ponteira e um peso pode ser vista na Figura 29.



Figura 29 - Montagem completa do martelo  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na montagem da Figura 29 está sendo usada a ponteira de aço carbono e a massa extra com todos os elementos disponíveis para agregar massa.

#### 4.2 Frequências Naturais presentes na FRF de ponto

Para primeiro ponto de aplicação do impacto na viga a resposta gerada é denominada FRF ponto. Na primeira sequência de impactos foi utilizado o martelo comercial. O procedimento consiste em aplicar três impactos, os quais geram dados para o software *Labview* da *National Instruments* no qual já tem embutido o analisador de FRF, resultando então em um conjunto de pontos tabulados em uma planilha, para posteriormente serem plotados através do *Microsoft Excel*.

O conjunto de dados resultante da primeira medição pode ser visto na Figura 30 e será usado de referência para interpretar os dados gerados com o segundo martelo.

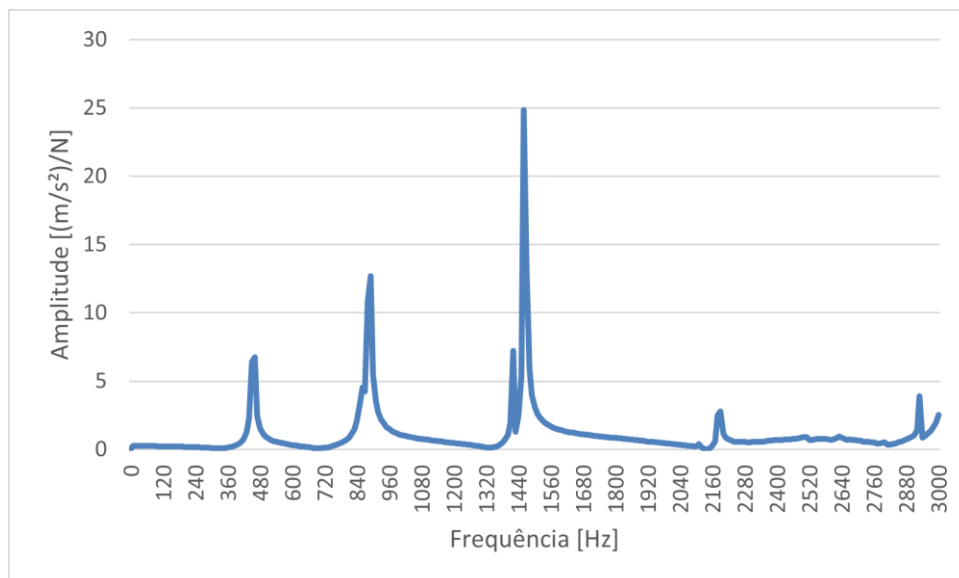


Figura 30 - FRF de ponto, ponteira de nylon utilizando o martelo B&K  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

O gráfico gerado a partir dos três impactos utilizando o martelo comercial, conforme pode ser visto na Figura 30, permite observar alguns picos de amplitude que indicam a presença de frequências naturais. Pode-se observar então a partir dos picos que a viga utilizada nos experimentos possui frequências naturais nas faixas de 460 Hz, 890 Hz, 1460 Hz, 2180 Hz e 2930 Hz.

Essas cinco frequências serão a referência, embora seja possível visualizar um outro pico presente em 1400 Hz, uma vez que são picos mais expressivos.

Para o mesmo ponto de aplicação foi gerado também o conjunto de dados utilizando o martelo protótipo, conforme pode ser visto na Figura 31.

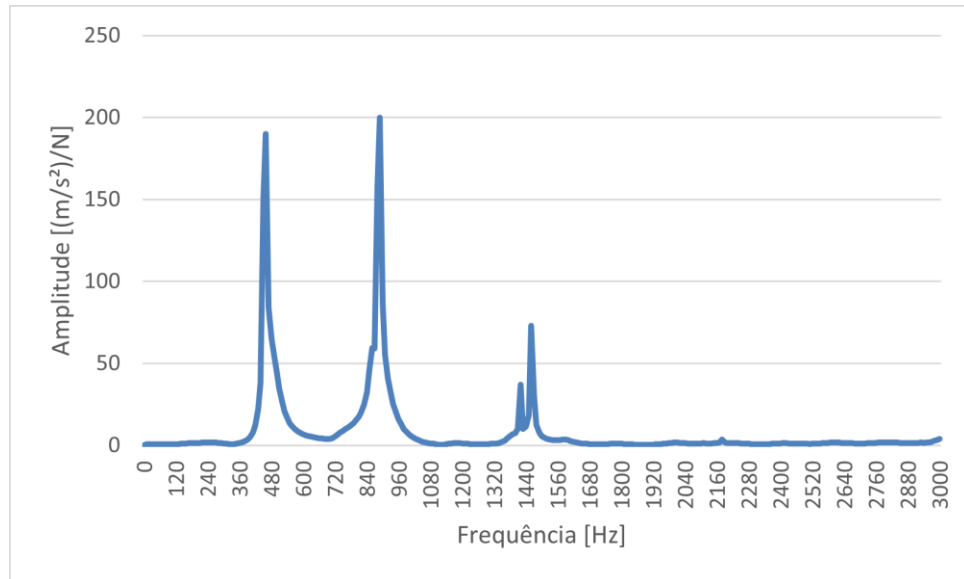


Figura 31 – FRF de ponto, ponteira de PETG utilizando o martelo em desenvolvimento  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A resposta em frequência obtida na Figura 31 apresenta os três picos localizados nas frequências 460 Hz, 890 Hz, 1460 Hz e por fim um pico menos expressivo localizado em 2180 Hz.

A fim de comparar as duas respostas obtidas, as funções de resposta em frequência para cada medição foram plotadas simultaneamente conforme a Figura 32 e organizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação entre as frequências obtidas na FRF de ponto

Frequência natural	Martelo B&K [Hz]	Martelo Protótipo [Hz]	Erro Percentual [%]
1 <sup>a</sup>	460	460	0
2 <sup>a</sup>	890	890	0
3 <sup>a</sup>	1460	1460	0
4 <sup>a</sup>	2180	2180	0
5 <sup>a</sup>	2930	--	100

Fonte: Pesquisa direta (2023)

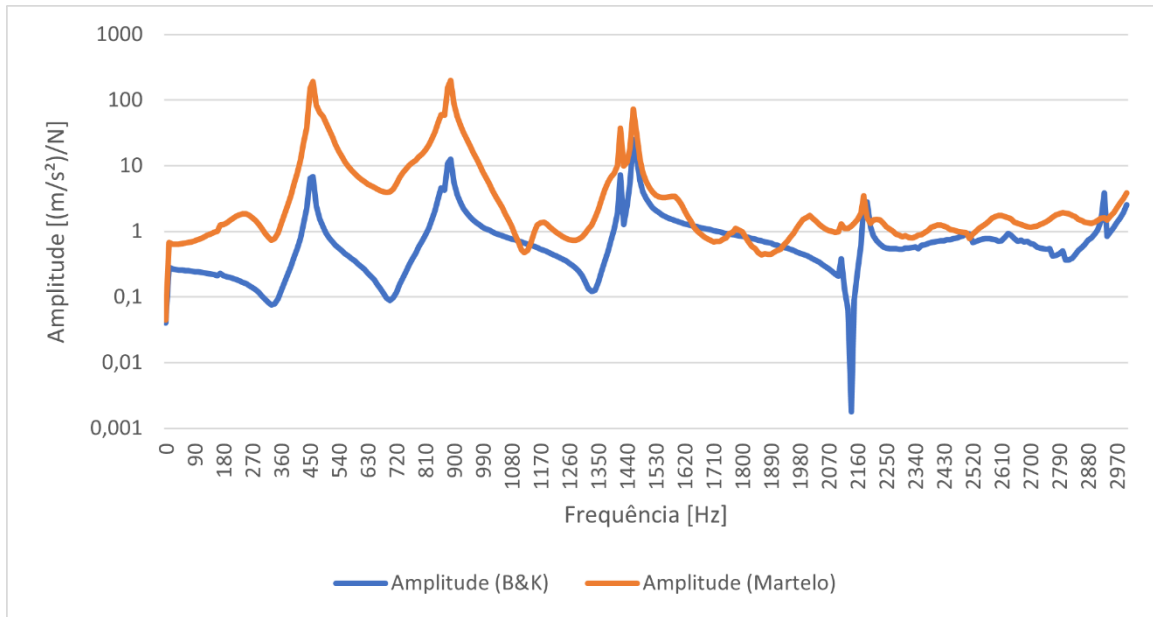


Figura 32 - Comparação FRF de ponto  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 32, associada à Tabela 3, consiste na comparação entre as medições resultantes de cada martelo utilizado, sendo aplicada uma escala logarítmica afim de aproximar as amplitudes de modo a facilitar a visualização dos picos. É possível identificar que os picos obtidos pelo martelo comercial coincidiram com os picos resultantes do impacto gerado pelo martelo desenvolvido para o trabalho.

Outro parâmetro importante para analisar a qualidade das medições é a função de coerência. Este parâmetro tanto para a medição realizada pelo martelo comercial, quanto para o protótipo pode ser visto na Figura 33.

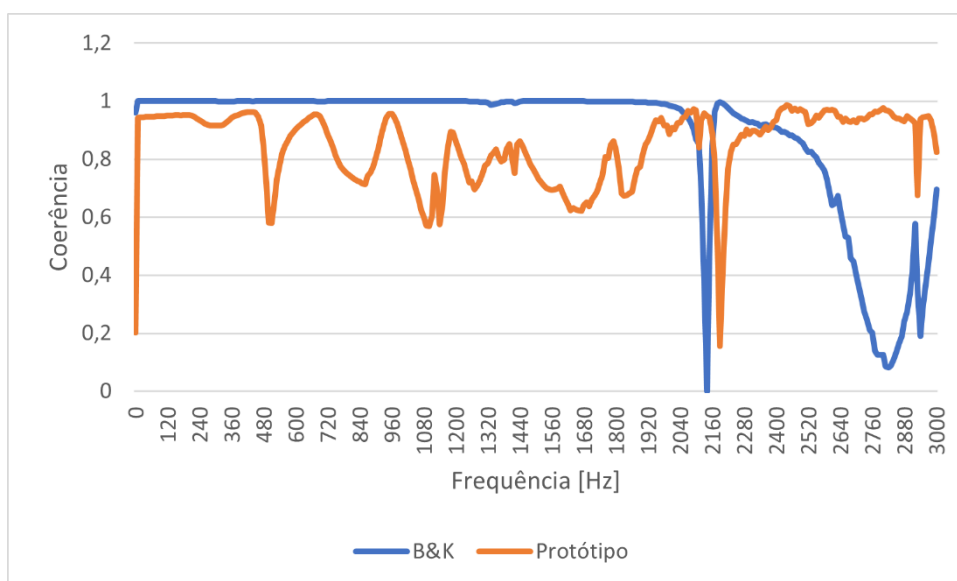


Figura 33 - Função de coerência para a FRF de ponto  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 33 faz a comparação entre a função de coerência do martelo comercial e o protótipo desenvolvido. Considerando todos os aspectos técnicos envolvidos no martelo comercial era esperado que sua função de coerência se mantivesse mais estável e próxima de um. Embora o martelo protótipo apresente uma função de coerência variável é possível perceber que em valores próximos de uma frequência natural o valor de coerência se aproxima de um.

### 4.3 Frequências naturais encontradas na FRF de transferência

A segunda parte do experimento consiste em alterar o local de aplicação do impacto. A função gerada pela mudança do ponto é denominada FRF transferência. A Figura 33 mostra o resultado obtido utilizando o martelo comercial da *B&K*.

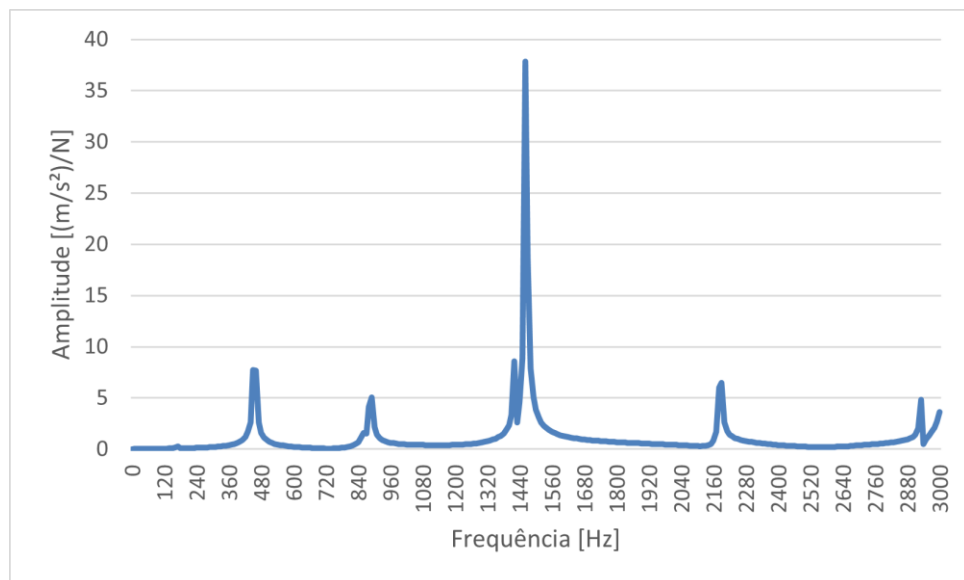


Figura 34 – FRF de transferência, ponteira de nylon utilizando o martelo B&K  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pode-se observar que os picos presentes na Figura 34 indicam frequências naturais presentes nas faixas 450 Hz, 880 Hz, 1460 Hz, 2190 Hz e 2930 Hz.

Por fim, o último conjunto de dados gerado foi a FRF transferência utilizando o martelo em desenvolvimento. O conjunto de dados gerado pode ser visto na

Figura 35.

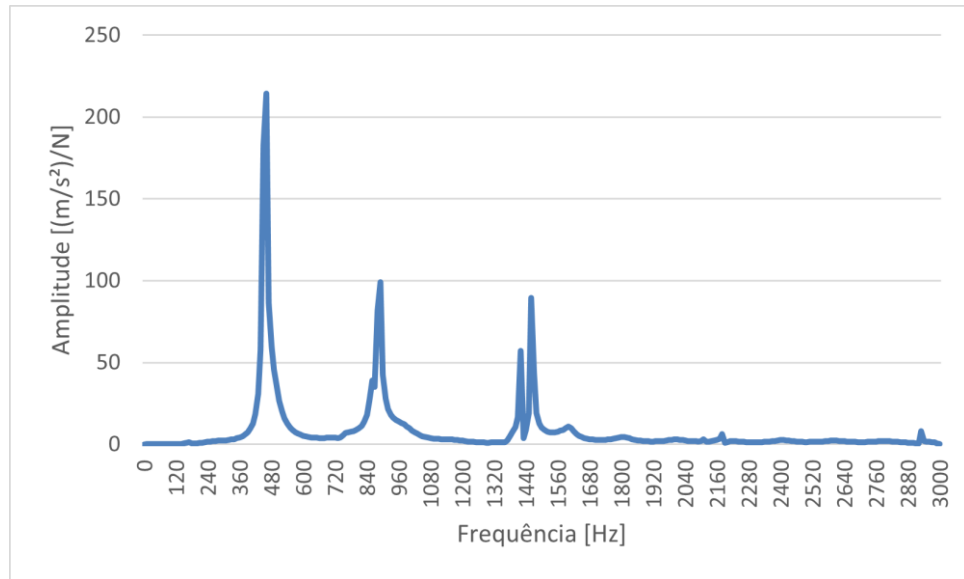


Figura 35 - FRF de transferência, ponteira de PETG utilizando protótipo  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A

Figura 35 apresenta picos de frequência nas faixas de 460 Hz, 890 Hz, 1460 Hz, 2190 Hz e 2930 Hz. Embora as duas últimas sejam menos acentuadas é possível visualizar um início de pico dentro dos espectros.

Analogamente a comparação realizada para a FRF ponto, para verificar as respostas da FRF transferência os resultados obtidos através das medições também foram plotados simultaneamente conforme a Figura 36 e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre as frequências obtidas na FRF de transferência

Pico	Martelo B&K [Hz]	Martelo Protótipo [Hz]	Erro Percentual [%]
1°	450	460	2,22
2°	880	890	1,14
3°	1460	1460	0
4°	2180	2190	0,46
5°	2930	2930	0

Fonte: Pesquisa direta (2023)



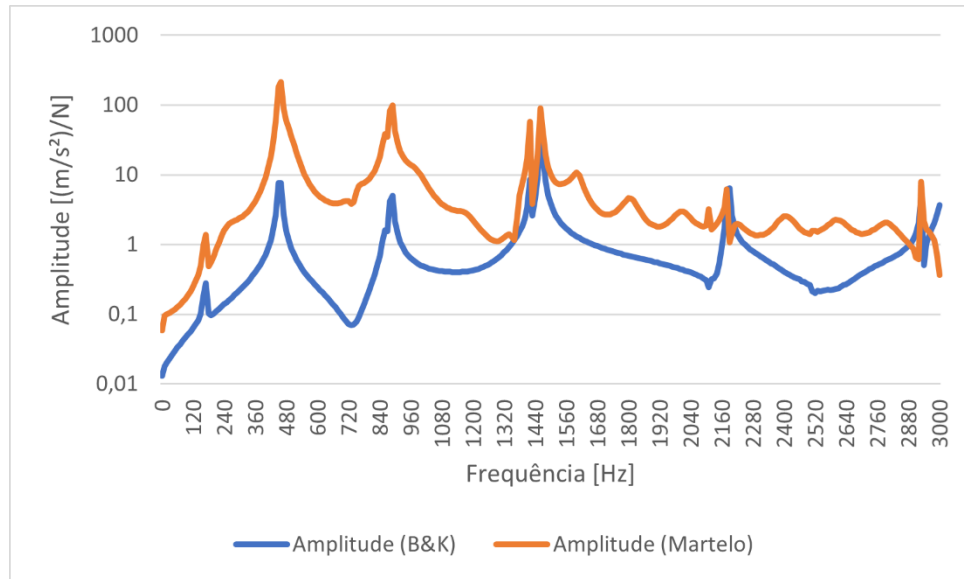


Figura 36 - Comparação FRF de transferência  
 Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 36 permite observar que os picos de amplitude observados para o martelo desenvolvido coincidem com os obtidos para o martelo comercial. A fim de facilitar a visualização dos dados foi usada uma escala logarítmica no eixo da amplitude, uma vez que apenas as frequências correspondentes a um pico são de interesse. Usando uma escala logarítmica foi possível inclusive identificar mais uma frequência com picos coincidentes localizada na região de 170 Hz, demonstrando então mais um fator de semelhança entre ambos os instrumentos.

As funções de coerência também foram plotadas simultaneamente para o caso da FRF de transferência, conforme Figura 37.

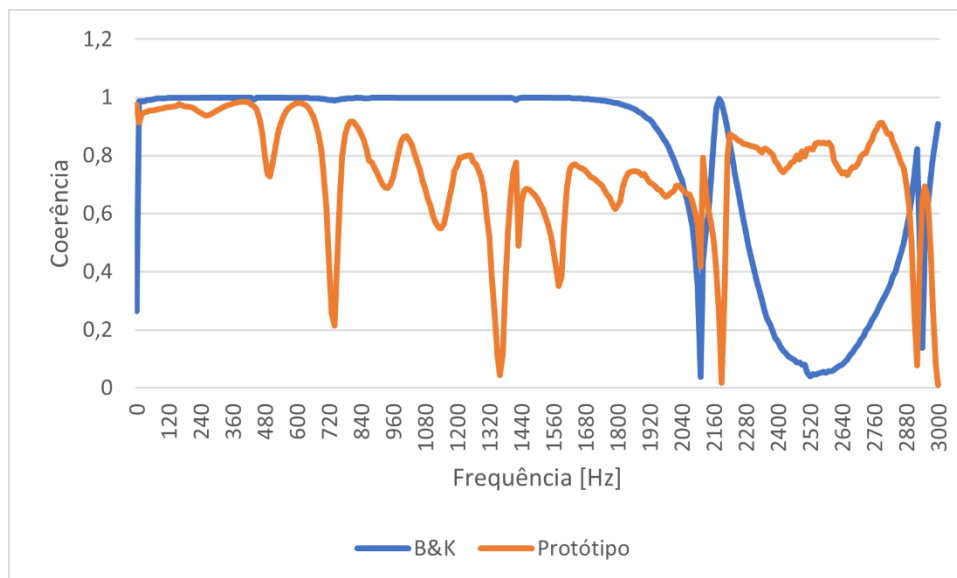


Figura 37 - Função de coerência para a FRF de transferência  
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 37 ilustra a comparação da função de coerência entre o martelo de impacto comercial e o protótipo. A curva apresentada em laranja, referente ao martelo de impacto de baixo custo, exemplifica a qualidade do sinal próximo a uma frequência natural quando comparado a outras faixas. E ainda mostra que frequências naturais menos participantes não tendem a levar a coerência para valores próximos de um, como é o caso de frequências mais expressivas.

#### 4.4 Amortecimento modal para a FRF de ponto

O amortecimento modal referente às medições realizadas através da primeira bateria de experimentos foi obtido utilizando a técnica da meia frequência para quatro picos escolhidos conforme expressividade em cada uma das funções de resposta em frequência de cada martelo, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Amortecimentos modais para a FRF ponto

Frequência Natural	Amortecimento martelo B&K	Amortecimento martelo protótipo	Erro Percentual [%]
1 <sup>a</sup>	0,014572	0,013665	6,22
2 <sup>a</sup>	0,007822	0,00756	3,35
3 <sup>a</sup>	0,00338	0,003067	9,26

4 <sup>a</sup>	0,002866	0,002691	6,11
----------------	----------	----------	------

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A Tabela 5 permite comparar o amortecimento modal de referência, obtido através do impacto gerado pelo martelo comercial com o amortecimento modal obtido utilizando o martelo desenvolvido para o trabalho. É possível identificar que os valores calculados para o protótipo estão próximos da referência esperada em uma relação de aproximadamente noventa por cento.

#### 4.5 Amortecimento Modal para FRF de Transferência

Analogamente a comparação realizada para a FRF ponto, o amortecimento modal referente à segunda fase experimental foi mensurado conforme pode a Tabela 6.

Tabela 6 - Amortecimentos modais para a FRF transferência

Frequência Natural	Amortecimento martelo B&K	Amortecimento martelo protótipo	Erro Percentual [%]
1 <sup>a</sup>	0,01476	0,014053	4,79
2 <sup>a</sup>	0,009651	0,009666	0,16
3 <sup>a</sup>	0,003296	0,003213	2,52
4 <sup>a</sup>	0,003283	0,003203	2,44

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A Tabela 6 traz os valores de comparação para cada pico encontrado nas respostas de cada martelo. A tabela ilustra a proximidade dos valores obtidos pelo martelo protótipo em relação aos valores de referência resultantes do ensaio utilizando o martelo comercial *B&K tipo 8206*. Quando comparados os resultados em cada pico, observa-se que os valores obtidos estão próximos em uma margem de aproximadamente noventa e cinco por cento do valor referência.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo final são apresentadas as conclusões acerca do trabalho desenvolvido experimentalmente e ainda são feitas recomendações acerca da utilização do martelo de impacto desenvolvido.

### 5.1 Conclusão

O procedimento experimental realizado a fim de verificar a aplicabilidade do martelo de impacto desenvolvido para o presente trabalho gerou quatro gráficos, sendo dois deles referentes ao impacto em um ponto da viga e os outros dois em outro ponto. Considerando que o martelo comercial possui uma maior confiabilidade devido a inúmeros fatores como qualidade de sensores, materiais, processo de calibração e experiência por parte do fabricante, os gráficos gerados através dele foram usados como comparativo a fim de determinar a performance do martelo construído.

Ao se comparar os resultados entre os dois martelos é possível identificar que as frequências obtidas através do martelo *B&K Tipo 8206* são próximas às obtidas com o martelo desenvolvido, apresentando uma diferença máxima de 2,22% dentre os picos coincidentes. É possível identificar, entretanto, que os picos das últimas duas frequências mais altas são bem menos expressivos quando comparados com os outros. Desta forma, através da comparação entre o instrumento comercial e o protótipo é possível indicar que o martelo de baixo custo desenvolvido foi capaz de encontrar as frequências naturais, com um grau de confiabilidade elevado, pelo menos para as quatro primeiras...

Além das frequências encontradas, destaca-se também a proximidade de valores quando os amortecimentos modais são comparados utilizando a técnica da meia potência. O fato de os amortecimentos para a FRF de ponto terem um erro percentual máximo de 9,26% e 4,79% para a FRF de transferência compactua para indicar que o martelo desenvolvido para o trabalho é capaz de estimar frequências naturais e amortecimento modal de estruturas com baixo amortecimento.

### 5.2 Proposta de Trabalhos Futuros

O trabalho estimou parâmetros modais de uma viga de aço SAE 1020 obtidos através de ensaios de impacto utilizando um martelo construído a partir de materiais de baixo custo, entretanto seria interessante realizar ensaios com outros materiais a fim de identificar a

aplicabilidade do martelo. Ainda considerando outros ensaios a serem realizados, uma outra possibilidade seria de substituir a instrumentação e software utilizados para o presente trabalho por um microcontrolador tal como o Arduíno para realizar a coleta de dados e em sequência utilizar um algoritmo não comercial para gerar as funções de resposta em frequência de modo a reduzir ainda mais o custo do experimento.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

EWINGS, David. John. **Modal Testing: Theory and Practice**. 2ª. ed. Baldock (United Kingdom): Research Studies Press LTD., 2000.

FERNANDES, Guilherme Amorim. **Modelagem de sistemas mecânicos para controle ativo de vibrações**. 2018. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

FORNER, Luciano Panzera. **Análise Modal Numérica de um Conjunto Porta e Retrovisor de um Automóvel**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

LEME, Leandro Marinho Marques. **Estudo comparativo de técnicas de análise modal experimental no domínio da frequência em uma barra na condição de contorno livre-livre**. 2014. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

LOFRANO, Melina. **Técnicas para estimativa de FRFS angulares em análise modal experimental com aplicações a estruturas do tipo viga**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. doi:10.11606/D.18.2003.tde-11122003-125253. Acesso em: 2023-03-06

MARCONI, Marina de Andrade.; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9ª. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MORAIS, Pedro Faria Oliveira. **Avaliação dos parâmetros acústicos coletados no teatro municipal de Ouro Preto através do software REW**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 61 páginas. 2021

NETO, Adriano Jacon. **Estudo de teste modal por martelo de impacto e correlação de simulação transiente usando método de elementos finitos: um caso industrial**. 2016. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

PRONADOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ermani Cesar de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa do Trabalho Acadêmico**. 2ª. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RAO, Singiresu. S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SANTOS, Jean Pietro Carvalho dos. **Estudo de vibrações aplicada à um protótipo veicular modelo baja SAE**. 2019.

SCHMIDT, Ana Lucía. FFT: Transformada Rápida de Fourier. Estudiante de Ingeniería en Sistemas de Computación. **Universidad Nacional de Sur. Bahia Blanca**, Argentina. Marzo 2013, 2013.

SCHWARZ, Brian J.; Richardson, Mark. H. Experimental Modal Analysis. **CSI Reliability Week**, Orlando, FL, Jamestown, California, 1999.