

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMec**

BRUNO PILON SANTOS

**MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS
SUBMETIDAS A VARIAÇÃO DO TORQUE DE APERTO EM
ELEMENTOS DE FIXAÇÃO**



São Carlos – SP
2024

BRUNO PILON SANTOS

**MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS
SUBMETIDAS A VARIAÇÃO DO TORQUE DE APERTO EM
ELEMENTOS DE FIXAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

São Carlos - SP

2024

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS****COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 13/2024/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso**Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)****FOLHA DE APROVAÇÃO****BRUNO PILON SANTOS****MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS SUBMETIDAS A VARIAÇÃO DO TORQUE DE APERTO EM ELEMENTOS DE FIXAÇÃO****Trabalho de Conclusão de Curso****Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos**

São Carlos, 15 de fevereiro de 2024

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	Alexandre Tácito Malavolta
Membro da Banca 2	Vitor Ramos Franco



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 15/02/2024, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Ramos Franco, Docente**, em 15/02/2024, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Tácito Malavolta, Docente**, em 15/02/2024, às 11:11, 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 <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1357354** e o código CRC **3776E3D2**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.003578/2024-31

SEI nº 1357354

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Dedico este trabalho a minha família e amigos que me motivaram durante esta jornada.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão as pessoas que me apoiaram ao longo desta trajetória e que contribuíram de maneira significativa para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, agradeço ao meu professor e orientador Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki por todo seu tempo dedicado a me orientar na realização deste estudo, também por sua paciência e disponibilidade. A sua didática e maneira de lidar com os alunos são inspiradoras.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Universidade Federal de São Carlos, por todos os ensinamentos passados e contribuições valiosas tanto no âmbito profissional quanto no pessoal. Todos os momentos vividos durante os anos de graduação contribuíram para minha formação como profissional.

Aos meus amigos, principalmente os companheiros de turma de engenharia mecânica de 2017, que se tornaram pessoas muito importantes na minha vida e sempre me motivaram a persistir na graduação e enfrentar os desafios juntos, por mais difíceis que fossem. Estávamos juntos tanto nos momentos de festa, quanto nos momentos de estudos intensos.

À minha família que sempre me deu todo o suporte para que eu pudesse viver todos esses anos fora de casa, sabendo que eu tenho sempre um porto seguro onde posso descansar e desabafar nos momentos mais difíceis. Além de todo apoio e motivação que sempre me passaram e todos os conselhos para que eu me tornasse além de um bom profissional, uma boa pessoa para a sociedade.

Por fim, agradeço a Deus por colocar tantas pessoas boas na minha vida e me dar saúde para chegar até aqui. E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

*"If you got a chance take it
Take it while you got a chance
If you got a dream chase it
'Cause a dream won't chase you back."
Cody Johnson – 'Til You Can't.*

Resumo

A integridade de uma estrutura é influenciada por uma série de fatores que desempenham papéis cruciais na garantia de confiabilidade e segurança. Dentre esses fatores, os elementos de fixação assumem uma importância particular nos sistemas estruturais. A condição adequada desses elementos é fundamental para sua aplicação eficaz. Um exemplo comum é a utilização de parafusos com torques indicados para cada tipo de aplicação, dessa maneira, se algum parafuso apresentar um torque diferente do indicado, este pode comprometer a integridade de toda estrutura. Sendo assim, o monitoramento desses fatores é algo crucial para poder prever danos e manutenções nos componentes estruturais, afim de aumentar a longevidade e a segurança de sistemas em geral. Esse monitoramento é feito por meio de sensores implementados para realizar a medição de vibrações e identificar alterações nos parâmetros vibratórios ao longo da vida útil da estrutura. No presente estudo foram analisados os efeitos da variação do torque em elementos de fixação do tipo parafuso, num sistema de 2 graus de liberdade, por meio do monitoramento dos sinais de vibração da estrutura com o auxílio de sensores piezoelétricos. Ao final do estudo, foi possível identificar variações nos parâmetros de vibração causadas pelo desaperto dos elementos de fixação da estrutura, por meio da análise sensorial. Os testes com diferentes configurações de torque mostraram que o método foi efetivo, identificando variações no torque, especialmente quando os parafusos estavam totalmente afrouxados. Isso possibilita a detecção de um possível desaperto dos parafusos em estruturas metálicas, contribuindo assim para a técnica de monitoramento da integridade estrutural.

Palavras-chave: Monitoramento de vibrações; Elementos de fixação; Torque de aperto; Monitoramento de saúde de estruturas.

Abstract

The integrity of a structure is influenced by a series of factors that play crucial roles in ensuring reliability and safety. Among these factors, fasteners assume particular importance in structural systems. The proper condition of these elements is fundamental for their effective application. A common example is the use of screws with specified torques for each type of application; thus, if any screw has a torque different from the specified one, it can compromise the integrity of the entire structure. Therefore, monitoring these factors is crucial to predict damage and maintenance in structural components, aiming to increase the longevity and safety of systems in general. This monitoring is done through sensors implemented to measure vibrations and identify changes in vibratory parameters throughout the structure's life span. In this study, the effects of torque variation on fastening elements such as screws in a 2-degree-of-freedom system were analyzed by monitoring the structure's vibration signals with the aid of piezoelectric sensors. At the end of the study, it was possible to identify variations in vibration parameters caused by the loosening of the fastening elements of the structure through sensory analysis. Tests with different torque configurations showed that the method was effective in identifying torque variations, especially when the screws were fully loosened. This enables the detection of possible loosening of screws in metallic structures, thus contributing to the technique of monitoring structural integrity.

Keywords: Vibration monitoring; Fastening elements; Tightening torque; SHM.

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de monitoramento de saúde de estruturas.	2
Figura 2 - Gasoduto com flange parafusada instrumentado com acelerômetros.	5
Figura 3 - Estrutura utilizada para testes de SHM.	11
Figura 4 - Junta parafusada.	11
Figura 5 - CAD da estrutura.	12
Figura 6 - Ilustração da instrumentação	13
Figura 7 - Estrutura instrumentada.	14
Figura 8 - Torquímetro de Estalo com adaptador Allen	14
Figura 9 - Procedimento de aperto dos parafusos	15
Figura 10 - Viga sem junta parafusada.	16
Figura 11 - Martelo de Impacto	17
Figura 12 - Local do Impacto	18
Figura 13 - Chassi de aquisição de dados.	18
Figura 14 - Modos de Vibração da estrutura.	20
Figura 15 - FRFs de aceleração do Teste 1	22
Figura 16 - FRFs de aceleração dos Testes para o sensor do 1º Andar.	23
Figura 17 - FRFs de aceleração dos Testes para o sensor do 2º Andar.	23
Figura 18 - FRFs de aceleração dos Modos 5 e 6 do sensor do 1º Andar.	24
Figura 19 - Gráficos dos Modos da Tabela 4	25

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades do Parafuso.	16
Tabela 2 - Sequência de testes.	17
Tabela 3 - Comparativo das Frequências Naturais.	21
Tabela 4 - Frequências de Ressonância do sensor 1º andar para todos os testes.	24

Lista de Siglas

CAD	<i>Computer Aided-Design</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FRF	Função de Resposta em Frequência
FT	Função de Transferência
MEMS	<i>Micro-electromechanical systems</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
SHM	<i>Structure Health Monitoring</i>

Lista de Símbolos

$x(t)$	Função no domínio do tempo
ω	Frequência angular [rad/s]
m	Massa [kg]
c	Coefficiente de amortecimento
k	Constante de rigidez
\mathcal{F}	Transformada de Fourier
$F(\omega)$	Função no domínio da frequência
$A(\omega)$	Acelerância
i	Unidade imaginária
$x(n)$	Amostra da sequência discreta no índice n
N	Número total de amostras da sequência
ω_n	Frequência natural não amortecida
ω_d	Frequência natural amortecida

Sumário

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivos.....	3
2.	Revisão da literatura	4
3.	Fundamentação Teórica	7
3.1.	Função de Resposta em Frequência de sistemas vibratórios.....	7
3.2.	Transformada de Fourier e suas aplicações.....	8
3.3.	Transformada Rápida de Fourier (FFT)	9
4.	Materiais e métodos	10
4.1.	Projeto e construção da estrutura metálica e junta parafusada	10
4.2.	Instrumentação da estrutura e instrumentos de medição.....	12
4.3.	Método de realização do experimento.....	15
4.4.	Método de aquisição de dados.....	18
5.	Resultados e discussão	20
5.1.	Comparativo entre modelo numérico e modelo experimental.....	20
5.2.	Análise dos resultados dos testes experimentais	21
6.	Considerações finais e conclusão.....	28
	Referências.....	29
	Apêndice A – Código Matlab para 1 Teste.....	31
	Apêndice B – Código para Comparativo dos Testes 1º Andar	32

1. Introdução

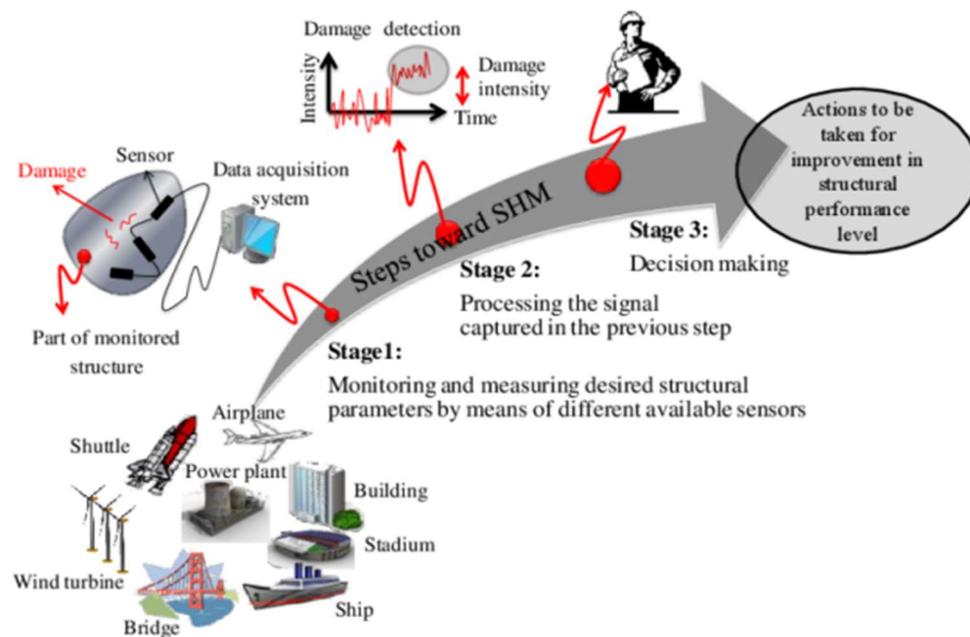
Os sistemas estruturais e mecânicos desempenham um papel fundamental na infraestrutura contemporânea, abrangendo uma gama diversificada de aplicações, como aeronaves, guindastes, pontes, estruturas metálicas e plataformas de petróleo. Devido à sua natureza, que implica custos significativos de produção e complexidades na substituição, a extensão da vida útil desses sistemas é de grande importância tanto do ponto de vista econômico quanto em termos de segurança estrutural. Nesses sistemas, os elementos de fixação, majoritariamente composto por parafusos, desempenham um papel crucial na garantia da estabilidade e segurança da estrutura. A detecção precoce de variações no torque de aperto desses elementos é de extrema importância para mitigar riscos que possam levar a falhas, resultando em possíveis consequências tanto para a segurança humana quanto para o aspecto financeiro (WANG, 2013).

Existem diversas maneiras de verificar se o torque de aperto ou força axial dos parafusos de uma estrutura está de acordo com o especificado ou se existe folga no sistema, tanto de maneira direta quanto indireta. Desde métodos mais simples como a verificação do torque dos parafusos com o auxílio de um torquímetro ou pelo aspecto visual da junta, como também pelo monitoramento de parâmetros como impedância eletromecânica e vibração das juntas parafusadas com o auxílio de sensores (NIKRAVESH; GOUDARZI, 2017) os quais se revelam mais interessantes visando a aplicação prática em grandes estruturas metálicas com um número alto de juntas parafusadas, ou estruturas que se encontram em lugares de difícil acesso.

Essa problemática enfatiza a importância da utilização de técnicas para o monitoramento da integridade de estruturas, do inglês *Structural health monitoring* (SHM), termo que se refere ao processo de implementação de uma estratégia de identificação de danos para infraestruturas de engenharia aeroespacial, civil ou mecânica. Este processo envolve a avaliação de uma estrutura ou sistema mecânico ao longo do tempo usando medições de uma resposta dinâmica espaçada periodicamente, a extração de características sensíveis a danos dessas medições e a análise estatística desses recursos para determinar o estado atual da integridade do sistema (FARRAR; WORDEN, 2012). Este monitoramento deve ser um processo não-destrutivo (e.g. não deve envolver o corte de uma peça aberta para inspecioná-la) e deve ser idealmente implementado de forma online com hardware/software embarcado de

forma automatizada durante a operação de um sistema (ADAMS, 2007), como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de monitoramento de saúde de estruturas.



Fonte: Malekzadeh, *et al.* (2014).

Os métodos e técnicas utilizados para a detecção de danos por meio do SHM podem ser divididos em duas classes principais: sistemas passivos, os quais dependem da variação dos parâmetros de vibração para a detecção dos danos e sistemas ativos, nos quais são necessários atuadores para excitar a estrutura possibilitando a análise da vibração causada para determinar se há danos ou não na estrutura (SHIKI; FRANCO, 2020). Este último caso corresponde ao método que foi utilizado neste presente estudo, na qual foi utilizada a metodologia de análise modal experimental utilizando a função de resposta de frequência (FRF) para detectar variações nas frequências de ressonância da estrutura causadas pela variação do torque de aperto de uma junta parafusada.

1.1. Objetivos

Considerando o cenário proposto, tem-se como objetivo geral desta monografia a avaliação dos efeitos da variação do torque em elementos de fixação de uma junta parafusada, presente em uma estrutura metálica de dois andares em escala reduzida, detectados a partir dos sinais de vibração por meio de acelerômetros piezoelétricos. Além disso, destacam-se como objetivos específicos do estudo:

- Analisar a resposta em frequência dos sinais de vibração de uma estrutura metálica variando os valores de torque de aperto aplicados a apenas uma junta parafusada;
- Realizar a adaptação da estrutura metálica de 2 andares de modo a enfatizar os efeitos causados pela variação do torque na junta parafusada a ser examinada;
- Aplicar um código desenvolvido em MATLAB para processar os dados obtidos nos testes, com o intuito de facilitar a comparação entre eles e fornecer uma análise mais precisa das características do sistema;

2. Revisão da literatura

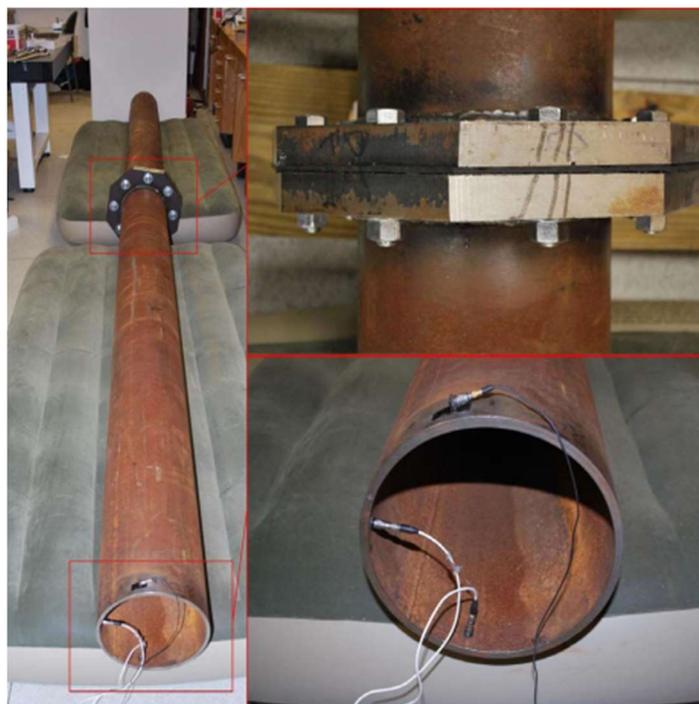
Juntas parafusadas são amplamente utilizadas em estruturas e equipamentos industriais devido às inúmeras vantagens que possuem. No entanto, o uso de parafusos nessas estruturas por si só pode causar falhas ou danos consideráveis. Uma das principais razões para falhas em tais estruturas é a folga, que pode impactar na diminuição da rigidez do sistema e no aumento da vibração do mesmo, podendo gerar falhas catastróficas (BICKFORD, 1998). De modo que o monitoramento desses parâmetros se mostra muito interessante para a detecção prévia de possíveis falhas.

Há diversas maneiras de detectar o afrouxamento de uma junta parafusada por meio do monitoramento de diferentes parâmetros de uma estrutura (NIKRAVESH; GOUDARZI, 2017). Dentre estes, destacam-se os métodos indiretos de medição, como por exemplo métodos que utilizam o processamento de imagens, o qual tem como base no uso de imagens/vídeos obtidos de câmeras digitais para registrar informações estruturais sensíveis a danos para caracterização de integridade e identificação de danos (PARK, 2015). Existem ainda métodos que permitem o exame de parâmetros de impedância da estrutura, tais como impedância eletromecânica com auxílio de transdutores piezoelétricos (ROSIEK; MARTOWICZ, 2012) e impedância elétrica (RITDUMRONGKUL, 2003), os quais tem como base o conceito de que a impedância de um sistema depende de características e parâmetros dinâmicos, portanto qualquer variação devido a uma falha, por exemplo uma folga em uma junta parafusada, pode impactar nestes parâmetros e causar uma variação do valor da impedância. Adicionalmente, há métodos que se concentram na utilização de ondas ultrassônicas para o monitoramento de juntas parafusadas (AMERINI; MEO, 2011), sendo possível uma medição com sensores ultrassônicos, os quais podem fornecer uma mensuração indireta da força aperto presente no parafuso sem a necessidade afrouxar o parafuso ou realizar testes de calibração sistemáticos (CHAKI; 2007).

O presente trabalho de conclusão direciona seu foco para o monitoramento do torque de aperto de uma junta parafusada por meio da análise dos parâmetros de vibração da estrutura. Milanese, *et al.* (2008) utilizaram duas abordagens para detecção de danos, uma baseada em propriedades estatísticas das deformações medidas e outra na potência do sinal em diferentes frequências. Ambas as técnicas são usadas para identificar afrouxamentos progressivos em uma junta experimental composta-metal, com dados coletados por um sistema de sensoriamento de

deformação óptica por fibra. Kajiwara, *et al* (2011) propuseram um sistema de teste de vibração e monitoramento de saúde estrutural usando um impulso induzido por laser para gerar respostas vibracionais de alta frequência, o que permite a detecção de danos microscópicos em estruturas, como o afrouxamento dos parafusos, utilizando um algoritmo de detecção de danos baseado na avaliação estatística de respostas de frequência medidas. He e Zhu (2014) utilizaram um método capaz de localizar e identificar a magnitude de danos por meio da alteração da frequência natural da estrutura, utilizado para identificar o afrouxamento de juntas parafusadas presentes em um flange parafusado em um gasoduto de tamanho real, o sensoriamento utilizado e a disposição dos acelerômetros é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Gasoduto com flange parafusada instrumentado com acelerômetros.



Fonte: He e Zhu, 2014.

Eraliev, *et al.* (2022) elaboraram uma abordagem diferente, a identificação dos estágios iniciais de afrouxamento de uma junta com diversos parafusos por meio de parâmetros de vibração com o auxílio de algoritmos de aprendizado de máquina. Os resultados deste estudo evidenciaram ser possível de identificar não só o estado inicial de afrouxamento, como também qual parafuso da junta começou a apresentar folga. Krot, *et al.* (2022) elaboraram uma pesquisa que aborda o diagnóstico de folgas radiais nos suportes de rolamentos e afrouxamento de juntas parafusadas em caixas de engrenagens de máquinas pesadas. Por meio da análise de sinais de

vibração, conforme a comparação de frequências naturais e seus harmônicos, essa abordagem permite monitorar as condições dos componentes e tomar medidas de manutenção preventiva para evitar falhas. Miguel, *et al* (2022) elaboraram um modelo capaz de detectar a perda de torque de aperto com base em parâmetros modais de uma estrutura a partir da aplicação combinada de dois métodos probabilísticos de aprendizado de máquina, capazes de detectar adequadamente o estado real do torque de uma junta parafusada usando uma medida indireta de vibração, ou seja, sem a necessidade de um sensor de torque em cada parafuso.

Tanner, *et al.* (2003) utilizaram um método de monitoramento de saúde de estrutura online com o auxílio de sensores do tipo microelétrico-mecânico, acoplado a uma estrutura metálica com uma junta parafusada de pré-carga controlada por meio de um atuador piezoelétrico, o qual foi responsável por variar a pré-carga da junta parafusada gradualmente. Esse sistema foi capaz de identificar variações na pré-carga da junta por meio de algoritmos que analisaram os parâmetros de vibração captados pelos acelerômetros. De forma análoga, porém não com o intuito examinar o torque de aperto de uma junta parafusada, mas sim danos em uma estrutura, Shiki e Franco (2020) realizaram um estudo sobre monitoramento de saúde de estruturas com o uso de acelerômetros do tipo *micro-electromechanical systems* (MEMS), modelo ADXL335, para detecção de danos em uma estrutura metálica que simulava um prédio de dois andares em pequena escala. A partir da decomposição do domínio de frequência, foi possível identificar os danos na estrutura e sua propagação por meio de índices de dano baseados em frequência naturais.

Considerando todas as referências apresentadas e o crescente número de estudos focados no monitoramento da saúde de estruturas e na detecção do afrouxamento de juntas parafusadas, torna-se ainda mais evidente a relevância de desenvolver e validar pesquisas que explorem novas técnicas e diferentes abordagens para investigar parâmetros ligados a estas problemáticas.

3. Fundamentação Teórica

No capítulo de Fundamentação Teórica, são abordados conceitos fundamentais para o estudo de sistemas vibratórios. Destaca-se a Função de Resposta em Frequência como uma ferramenta essencial para analisar a resposta de um sistema a diferentes frequências de excitação. Além disso, discute-se a Transformada de Fourier, que permite decompor um sinal no domínio do tempo em suas componentes de frequência, sendo de grande importância na análise de sinais vibratórios. Por fim, aborda-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), um algoritmo eficiente para calcular a Transformada de Fourier de forma rápida, sendo amplamente utilizada em análises de sinais e sistemas vibratórios.

3.1. Função de Resposta em Frequência de sistemas vibratórios

É denominado vibração ou oscilação qualquer movimento que se repita após um determinado intervalo de tempo. Assim sendo, a teoria da vibração trata do estudo de fenômenos oscilatórios e as consequências provenientes destes. Sistemas vibratórios encontrados na prática normalmente contêm um meio de armazenamento de energia potencial, uma mola por exemplo, um meio de armazenamento de energia cinética, como uma massa, e um meio para a perda gradual de energia, ou seja, amortecimento (RAO, 2008).

A função de resposta em frequência caracteriza a ligação entre a excitação de um sistema, seja por meio de uma força ou aceleração, e a resposta dinâmica do sistema, sendo analisada no domínio da frequência. Essa função assume uma importância fundamental ao identificar as frequências ressonantes e os modos de vibração específicos de um sistema. Farrar e Worden (2012) apresentam uma maneira simples de demonstrar como é aplicada a função de resposta em frequência para um sistema de um grau de liberdade, o qual tem sua equação de movimento representada como:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t) \quad (1)$$

Pode-se observar que se trata de uma equação diferencial de segunda ordem no domínio do tempo, na qual $f(t)$ corresponde a entrada de força e os termos m , c , e k correspondem a massa, coeficiente de amortecimento e constante de rigidez do sistema de um grau de liberdade. Sendo assim, aplica-se a Transformada de Fourier em ambos os lados da equação para trabalhar no domínio da frequência.

$$\mathcal{F}[m\ddot{y} + c\dot{y} + ky] = \mathcal{F}[f(t)] \quad (2)$$

Aplicando a propriedade de linearidade da transformada de Fourier a equação (2):

$$\mathcal{F}[m\ddot{y}] + \mathcal{F}[c\dot{y}] + \mathcal{F}[ky] = \mathcal{F}[f(t)] \quad (3)$$

Obtem-se:

$$m(i\omega)^2 Y(\omega) + c(i\omega)Y(\omega) + kY(\omega) = F(\omega) \quad (4)$$

E dessa maneira obtem-se a função de resposta em frequência:

$$A(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + ic\omega + k} \quad (5)$$

Que pode ser descrita como:

$$Y(\omega) = A(\omega)F(\omega) \quad (6)$$

Assim, um sistema descrito por uma equação diferencial no domínio do tempo pode ser resolvido no domínio da frequência usando apenas o operador de multiplicação. Entretanto, uma vantagem do método da resposta em frequência é que se pode utilizar os dados obtidos diretamente a partir das medições feitas nos sistemas físicos sem a necessidade de recorrer aos respectivos modelos matemáticos (OGATA, 2010).

3.2. Transformada de Fourier e suas aplicações

Como já mencionado, a transformada de Fourier é uma técnica matemática utilizada para analisar funções no domínio da frequência, em oposição ao domínio do tempo. Ela é usada em várias disciplinas, como engenharia, física, estatística e processamento de sinais, para decompor uma função complexa em componentes de frequência. Segundo estudo de Pupin (2011), a Transformada de Fourier refere-se à Transformada de Fourier para funções contínuas, e esta por sua vez detecta frequências e representa qualquer função integrável $f(t)$ como a soma de exponenciais complexas com frequência angular ω e amplitude complexa $\mathcal{F}(f)(\omega)$:

$$\mathcal{F}(f)(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-it\omega} dt \quad (7)$$

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (8)$$

A função $f(\omega)$ carrega toda informação da função f , pois \mathcal{F} possui inversa, \mathcal{F}^{-1} .

A Transformada de Fourier da função f de domínio temporal passa para o domínio de frequência. A Transformada de Fourier apresenta várias operações geralmente calculadas em funções, por exemplo: combinações lineares, diferenciação, translação, dilatação, multiplicação por polinômios e convolução. E pode-se provar que de fato, $\mathcal{F}(\mathcal{F}^{-1}(F)) = F$ e $\mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(f)) = f$, ou seja, \mathcal{F} e \mathcal{F}^{-1} são inversas uma da outra (TITCHMARSH, 1962).

Além da Transformada Contínua de Fourier, a Transformada Discreta de Fourier (TDF) é uma ferramenta importante para análise de sinais em engenharia. Ela é especialmente útil quando se precisa analisar sinais em intervalos discretos de tempo, por exemplo, no presente estudo não se faz interessante estudar o sinal de vibração da estrutura anterior a aplicação da força pelo martelo de impacto ou posterior ao tempo de amostragem. A discretização e quantização de sinais, comumente feitas em aplicações computacionais, são processos essenciais para manipular e analisar sinais de forma digital. Isso permite que sinais contínuos sejam convertidos em formatos digitais para serem processados por computadores, viabilizando uma série de aplicações práticas em engenharia e outras áreas (TAKAHASHI, 2002).

3.3. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A Transformada Rápida de Fourier é um método eficiente que reordena os cálculos dos coeficientes de uma Transformada Discreta de Fourier (DFT). Trata-se de um algoritmo, que realiza uma avaliação da DFT com o menor esforço computacional, ao invés de realizar o cálculo da DFT diretamente pela definição. A FFT é uma técnica que possibilita avaliar a DFT de forma mais rápida e econômica, sendo uma das maiores contribuições para a análise numérica já realizada (PUPIN, 2011).

O algoritmo FFT reduz pela metade a DFT de N pontos em duas somas, em termos pares e em termos ímpares, cada uma torna-se uma DFT de $N/2$ pontos. É possível mostrar que esse esquema de cálculo permite reduzir a ordem de cálculo da DFT de $O(N^2)$ para apenas $O(N \log_2 N)$. Para dar um exemplo, suponha que $N = 1024$. Para a FFT, consegue-se uma economia de cálculo esforço da ordem 100: 1, e essa economia aumenta com N . Essa economia torna a FFT um dos algoritmos numéricos mais inteligentes do século XX (FARRAR; WORDEN, 2012).

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é uma técnica utilizada para converter sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. No contexto deste trabalho, a FFT foi aplicada aos dados de entrada (força aplicada pelo martelo de impacto) e saída (aceleração medida pelos acelerômetros piezoelétricos) para analisar a resposta da estrutura em diferentes frequências. A partir das FFTs, foram utilizados estimadores espectrais, como o PSD (Densidade Espectral de Potência), para calcular a FRF. Esta abordagem permitiu determinar a amplitude e a fase da resposta da estrutura em diferentes frequências, fornecendo informações valiosas para o estudo da sua dinâmica e comportamento vibratório.

4. Materiais e métodos

O capítulo de Materiais e Métodos descreve detalhadamente como o experimento foi conduzido, fornecendo informações essenciais para a replicação e compreensão dos resultados obtidos. Serão apresentados os materiais utilizados, incluindo a estrutura e seus componentes, dispositivos de medição e sensores. Além disso, serão descritos os métodos empregados, desde o aperto dos parafusos até o tratamento dos dados, detalhando a configuração dos testes, análise e tratamento dos dados.

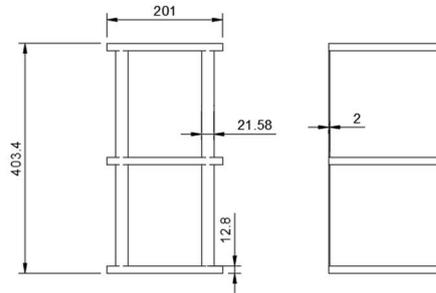
4.1. Projeto e construção da estrutura metálica e junta parafusada

De modo a buscar uma semelhança do experimento a ser realizado com uma situação real de aplicação, foi realizada a adaptação de uma bancada de testes previamente utilizada para estudos de monitoramento de saúde de estruturas (SHIKI; FRANCO, 2020), a qual consiste em um prédio de dois andares, sistema de 2 graus de liberdade, em pequena escala (Figura 3). Cada andar da estrutura é composto por uma chapa quadrada de alumínio com dimensões 201x201x12,8mm e para compor as vigas da estrutura foi utilizado alumínio perfil viga de 390,6 x 21,58 x 2 mm.

Figura 3 – Estrutura utilizada para testes de SHM



(a) Estrutural real.



(b) Dimensões da estrutura.

Fonte: Próprio autor.

Com o intuito de destacar os efeitos da variação do torque de aperto dos parafusos, foi realizada uma adaptação na estrutura (Figura 4). Um corte foi realizado em uma das vigas e instalada uma junta parafusada composta por 1 chapa de alumínio de dimensões 60x21,58x2mm e 2 conjuntos porca e Parafuso Allen Aço Liga Cabeça Abaulada M6 X 1.

Figura 4: Junta parafusada



(a) Junta parafusada

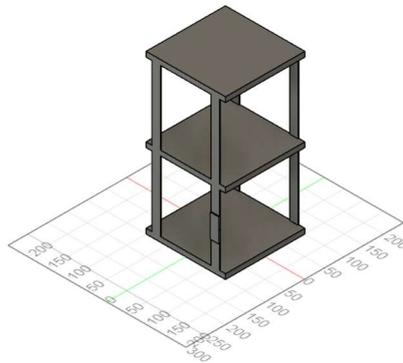


(b) Vista lateral da junta

Fonte: Próprio Autor

Com a intenção de conhecer as frequências naturais da estrutura por meio de um modelo numérico (Tabela 3) e posteriormente comparar com os dados do modelo experimental, foi realizado o projeto e simulação da estrutura por meio do software Autodesk Fusion 360 (Figura 5). Vale ressaltar que para simular a junta parafusada, foi realizado um aumento na espessura da viga de mesma dimensão da junta real, gerando um aumento da sua rigidez. Isso ocorre porque a espessura adicional aumenta a capacidade da viga de resistir a deformações, como flexão, torção ou cisalhamento. Por fim, as propriedades do material da estrutura foram adquiridas da própria biblioteca do software.

Figura 5: CAD da estrutura



Fonte: Próprio Autor.

4.2. Instrumentação da estrutura e instrumentos de medição.

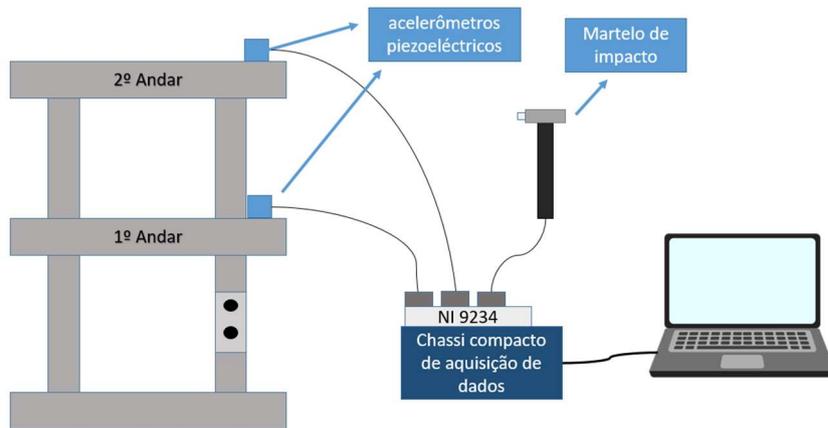
Para medição do torque de aperto e captação dos sinais de vibração da estrutura foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 1 Torquímetro de Estalo 3/8 Pol. 5 - 25 N.m - SATA-ST96212SC;
- 2 Acelerômetros PCB piezotronics modelo 333B30;
- 1 Chassi compacto de aquisição de dados National Instruments cDAQ-9174;
- 1 Martelo de impacto PCB piezotronics modelo 086C03;
- 1 Módulo de aquisição NI 9234;

Por se tratar de uma estrutura de 2 graus de liberdade, os acelerômetros foram posicionados um em cada andar da estrutura de modo a captar os sinais de vibração provenientes de cada pavimento. Tanto os sensores, como também o martelo de impacto, foram

conectados ao módulo de aquisição do chassi compacto de aquisição de dados, responsável por captar os sinais provenientes dos 3 equipamentos. Uma ilustração da configuração da estrutura para o teste é apresentada pela Figura 6.

Figura 6: Ilustração da instrumentação.

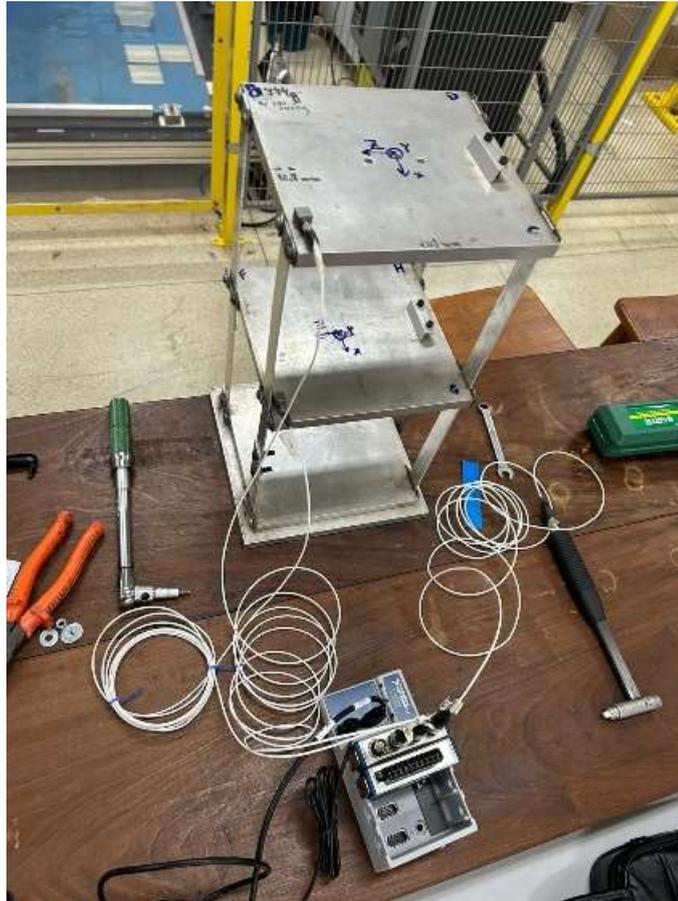


Fonte: Próprio Autor.

Os sensores foram posicionados na mesma posição, um em cada andar, próximos a viga que possui a junta parafusada no canto da estrutura, possibilitando a captação de movimentos de giro entre os andares e facilitando com que as oscilações em um andar possam ser diretamente comparadas com as oscilações no outro. Além disso, a estrutura foi fixada a bancada de testes por meio de um sargento, com a finalidade de permitir um controle das condições de contorno durante o teste, o que é importante para impedir que a estrutura se mova de maneira não intencional, o que poderia afetar a reprodutibilidade do teste e influenciar nos resultados finais, nos quais o único parâmetro a ser alterado é o torque de aperto dos parafusos. A configuração final da estrutura para realização do teste é apresentada na Figura 7.

Por fim, para a realização do aperto dos parafusos, foi necessária uma adaptação do torquímetro para correto acoplamento com parafuso Allen M6. Esta adaptação foi realizada com intuito de assegurar que o torque aplicado seja transmitido eficientemente do torquímetro para o parafuso, pois um acoplamento inadequado pode levar a erros na leitura do torque, já que parte da força aplicada pode ser perdida devido a folgas ou falta de contato adequado. O torquímetro utilizado, já com a adaptação realizada, é apresentado na Figura 8.

Figura 7: Estrutura instrumentada.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 8 - Torquímetro de Estalo com adaptador Allen.



Fonte: Próprio Autor.

4.3. Método de realização do experimento

Para o presente estudo, foi necessário escolher um método para a aplicação de torque na junta parafusada, bem como uma faixa de torque pré-determinada para realização do teste com diferentes valores. O aperto dos parafusos foi realizado por meio do torquímetro adaptado para o parafuso allen, com o auxílio de uma chave de boca para realizar o travamento e impedir o giro da porca. O método utilizado para o aperto dos parafusos é representado na Figura 9.

Figura 9 – Procedimento de aperto dos parafusos.



Fonte: Próprio Autor.

A faixa de torque escolhida para a realização do teste foi determinada com base na capacidade de leitura do torquímetro (5 – 25 N.m) e também na faixa de torque indicada para o parafuso Allen M6x1, as propriedades e o torque indicado para o parafuso são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do Parafuso

Parafuso Allen Aço Liga Cabeça Abaulada M6 X 1		
Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro nominal	6	[mm]
Comprimento	10	[mm]
Passo Rosca	1	[mm]
Rosca	M6	-
Classe	12.9	-
Toque indicado	6-10	[N.m]
Material	Aço Liga	-
Acabamento Superficial	Enegrecido de Têmpera	-

Fonte: INDUFIX (<https://www.indufix.com.br/classe-de-resistencia-de-parafusos/>)

A partir destas informações, foram escolhidas 5 configurações diferentes para a realização dos testes. Sendo elas: torques de 6, 8 e 10 N.m, junta totalmente afrouxada e também para configuração sem a junta parafusada (Figura 10). Para cada configuração, foram realizados 10 testes e para ter uma maior amostragem de dados, foi decidido realizar os testes alterando os valores de torque de forma crescente e decrescente e no intervalo entre os testes, a junta era totalmente afrouxada antes de se aplicar o próximo valor de torque. A ordem e a configuração de cada teste são apresentados na tabela 2. No total, foram realizados 80 testes.

Figura 10 – Viga sem junta parafusada.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 2 – Sequência de testes

Ordem	Torque Aplicado	Unidade
1°	6	[N.m]
2°	8	[N.m]
3°	10	[N.m]
4°	Junta totalmente afrouxada	-
5°	10	[N.m]
6°	8	[N.m]
7°	6	[N.m]
8°	Sem junta parafusada	-

Fonte: Próprio Autor

O método escolhido para a excitação da estrutura foi a entrada de força por meio de um martelo de impacto, modelo PCB piezotronics 086C03 (Figura 11), conectado ao módulo de aquisição de dados NI 9234, de modo que fosse possível ter conhecimento da magnitude da força aplicada em cada teste, valor de interesse para a realização da análise dos sinais de vibração, que será explicada posteriormente. Buscando uma maior reprodutibilidade e poder de comparação entre os valores adquiridos nos testes, o local escolhido para a realização do impulso foi padronizado para todos os testes (Figura 12).

Figura 11 – Martelo de impacto.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 12 – Local do impacto.



Fonte: Próprio Autor.

4.4. Método de aquisição de dados

Para a aquisição e a gravação dos dados foram utilizados 2 Acelerômetros PCB piezotronics modelo 333B30 e um martelo de impacto PCB piezotronics 086C03 conectados ao módulo de aquisição de dados National Instruments 9234 (Figura 13), em conjunto com o Software LabView, o qual oferece uma plataforma gráfica de programação, facilitando a criação de aplicações personalizadas para aquisição, processamento e análise de dados em tempo real.

Figura 13 – Chassi de aquisição de dados.



Fonte: Próprio Autor.

Para a realização do teste, foi necessário determinar no LabView uma frequência de amostragem, parâmetro que se refere a taxa na qual amostras discretas são extraídas de um sinal contínuo, bem como um tempo de aquisição. Segundo Teorema de Nyquist-Shannon, a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima presente no sinal analógico original para que o sinal digitalizado possa ser completamente reconstruído sem perda de informação (GOYAL; PABLA, 2016). Sendo assim, a frequência de amostragem definida foi de 3200 Hz e o tempo de aquisição de 50 segundos, valores que se mostraram suficientes para o presente estudo. Cada teste forneceu valores de entrada de força, impacto do martelo, e de aceleração proveniente dos acelerômetros posicionados no primeiro e no segundo andar da estrutura. Estes valores foram gravados em arquivos de texto, gerando um total de 80 arquivos, 10 para cada configuração de torque.

A partir dos dados destes arquivos, foi aplicada uma rotina em MatLab para executar uma análise de resposta em frequência (FRF), apresentada nos Apêndices A e B. O código é responsável por transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. De modo que, o código processa os dados, identificando o início dos impulsos causados por impactos de um martelo de impacto. Em seguida, ele utiliza técnicas de análise espectral, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Densidade Espectral de Potência (PSD), incorporada na função “*tfestimate*” do MatLab, para estimar as funções de transferência no domínio da frequência entre a força de impacto aplicada e as acelerações medidas nos dois andares da estrutura. A saída consiste nas magnitudes dessas funções de transferência, representando a resposta da estrutura em termos de amplitude e fase em diferentes frequências, permitindo a análise das características dinâmicas e vibracionais da estrutura em resposta às diferentes configurações de torque. Dessa maneira, foi possível identificar as frequências naturais da estrutura por meio do fenômeno de ressonância para cada torque aplicado a junta parafusada. A estrutura do teste exibe um amortecimento sutil, permitindo que as frequências naturais não amortecida (ω_n) e amortecida (ω_d) se aproximem consideravelmente. Esse comportamento permite uma simplificação na análise, tratando-as como uma única frequência natural, facilitando a compreensão e modelagem do sistema.

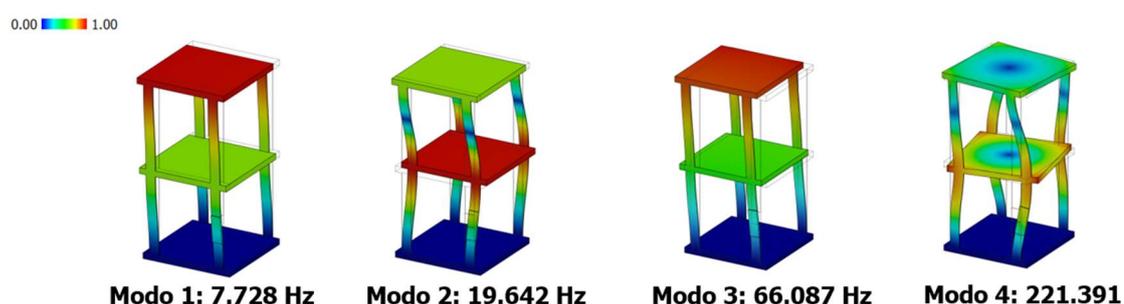
5. Resultados e discussão

O capítulo de Resultados e Discussões apresenta uma análise comparativa entre o modelo numérico e o modelo experimental, visando avaliar a eficácia e a precisão do modelo teórico em relação aos dados obtidos na prática. Serão discutidas as semelhanças, diferenças e possíveis discrepâncias entre os resultados, identificando as limitações dos modelos utilizados. Além disso, serão analisados os resultados dos testes experimentais, destacando as tendências, padrões e fenômenos observados durante os experimentos. Essa análise visa fornecer informações relevantes para a compreensão do comportamento do sistema estudado, contribuindo para o aprimoramento dos modelos teóricos e das metodologias de análise.

5.1. Comparativo entre modelo numérico e modelo experimental

Como mencionado no capítulo anterior, foi realizada uma simulação de um modelo CAD representativo da estrutura para encontrar as suas frequências naturais e os seus modos de vibração por um método numérico (Figura 14) e a partir disso realizar a comparação com os dados encontrados a partir dos métodos experimentais. Este comparativo é apresentado na tabela 3, tomando como base o teste com configuração de torque de 10N.m na junta parafusada e os dados da simulação realizada no software Autodesk Fusion 360, no qual foi realizada a restrição dos movimentos da base da estrutura, buscando uma representação da situação real do experimento.

Figura 14 – Modos de Vibração da estrutura



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3 – Comparativo das Frequências Naturais

Frequências Naturais Encontradas [Hz]			
Modo de vibração	Método Numérico	Método Experimental	Erro [%]
1	7,728	6,425	16.860
2	19,642	18,125	7.723
3	66,087	67,975	2.856
4	221,391	211,775	4.343

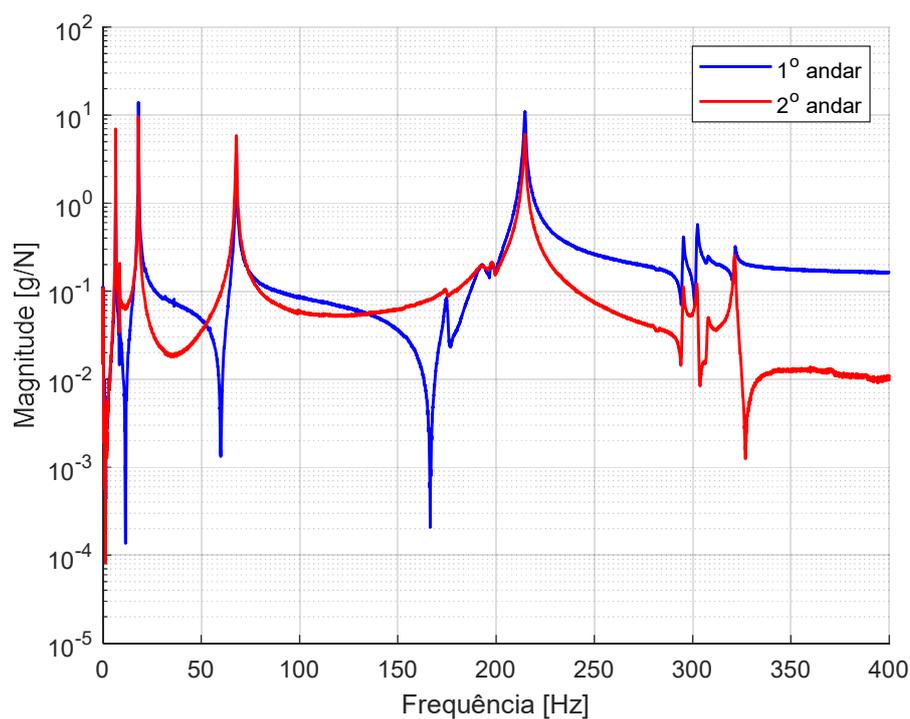
Fonte: Próprio Autor.

Os dados encontrados apresentaram uma similaridade, o que torna possível constatar que o modelo e a simulação foram bem representativos. O maior erro encontrado foi de aproximadamente 16,86% na medida mais discrepante, o que pode ser causado por condições de contorno não ideais e pelas diferenças entre modelo e condições reais da estrutura, visto que o modelo simulado é composto por uma estrutura monolítica, diferente da estrutura real que é composta por componentes separados parafusados.

5.2. Análise dos resultados dos testes experimentais

Posteriormente a realização dos testes de bancada com as 8 configurações, aquisição dos dados e aplicação da rotina do MatLab para estimar a função de resposta em frequência (FRF), envolvendo a transformação dos dados do domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da transformada rápida de Fourier (FFT). Foram gerados gráficos com os dados de magnitude [g/N] por frequência [Hz] para cada configuração, apresentando as curvas para os sensores posicionados no 1º e 2º andar da estrutura, exemplificado pelo gráfico da Figura 15, gerado a partir o teste 1, com configuração de torque de aperto com 6 N.m.

Figura 15 – FRFs de aceleração do Teste 1

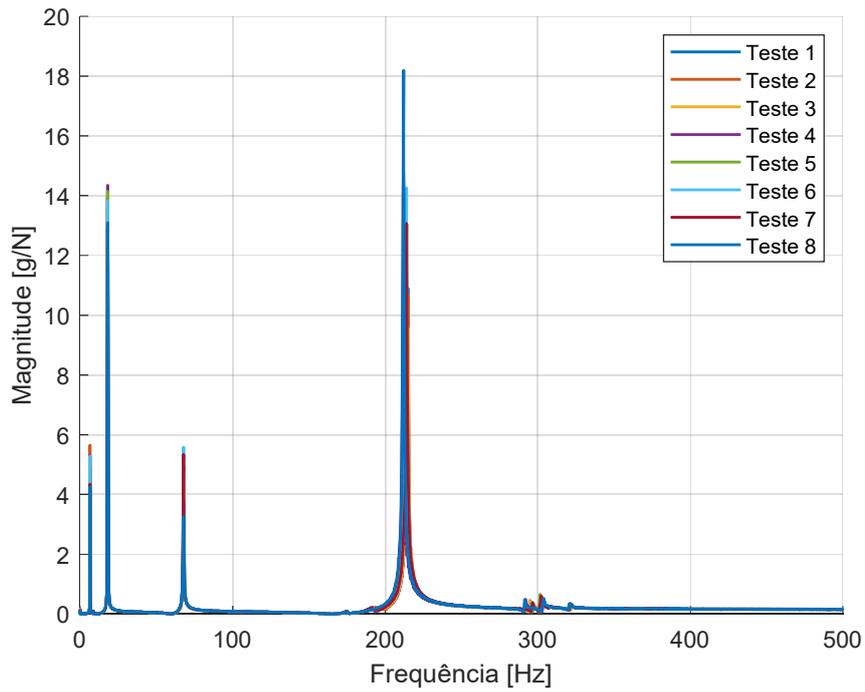


Fonte: Próprio Autor.

Ao observar o gráfico, é possível identificar as frequências de ressonância, caracterizadas pelos picos das curvas, as quais representam uma estimativa para as frequências naturais da estrutura, apesar de possíveis desvios de medição que podem ser causados pelas condições de contorno do teste.

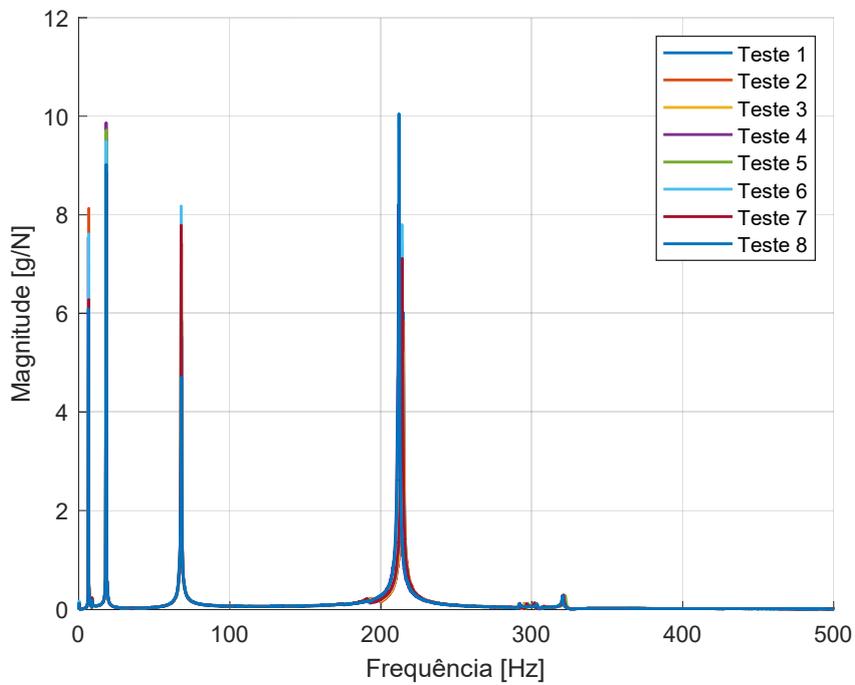
Para uma melhor análise e comparação entre os resultados dos testes, foram gerados gráficos com as repostas de todas as configurações para o sensor do 1º andar (Figura 16) e para o sensor do 2º andar (Figura 17). Apesar de sutis, as diferenças entre as respostas para cada configuração são visíveis e apresentadas de forma mais explícita pelo gráfico apresentado na Figura 18, no qual são apresentados apenas os dados para os 5º e 6º modos de vibração provenientes do sensor posicionado no 1º andar da estrutura para todos os testes, presentes entre as frequências de 290 a 306 Hz.

Figura 16 – FRFs de aceleração dos Testes para o sensor do 1º Andar.



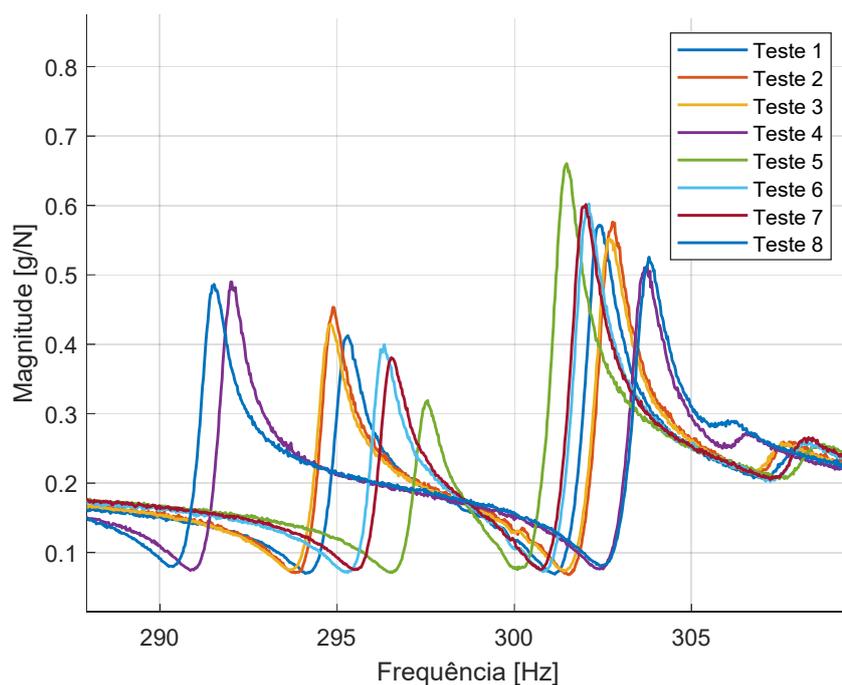
Fonte: Próprio Autor.

Figura 17 – FRFs de aceleração dos Testes para o sensor 2º Andar.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 18 – FRFs de aceleração dos Modos 5 e 6 do sensor do 1º Andar.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4: Frequências de Ressonância do sensor do 1º andar para todos os testes.

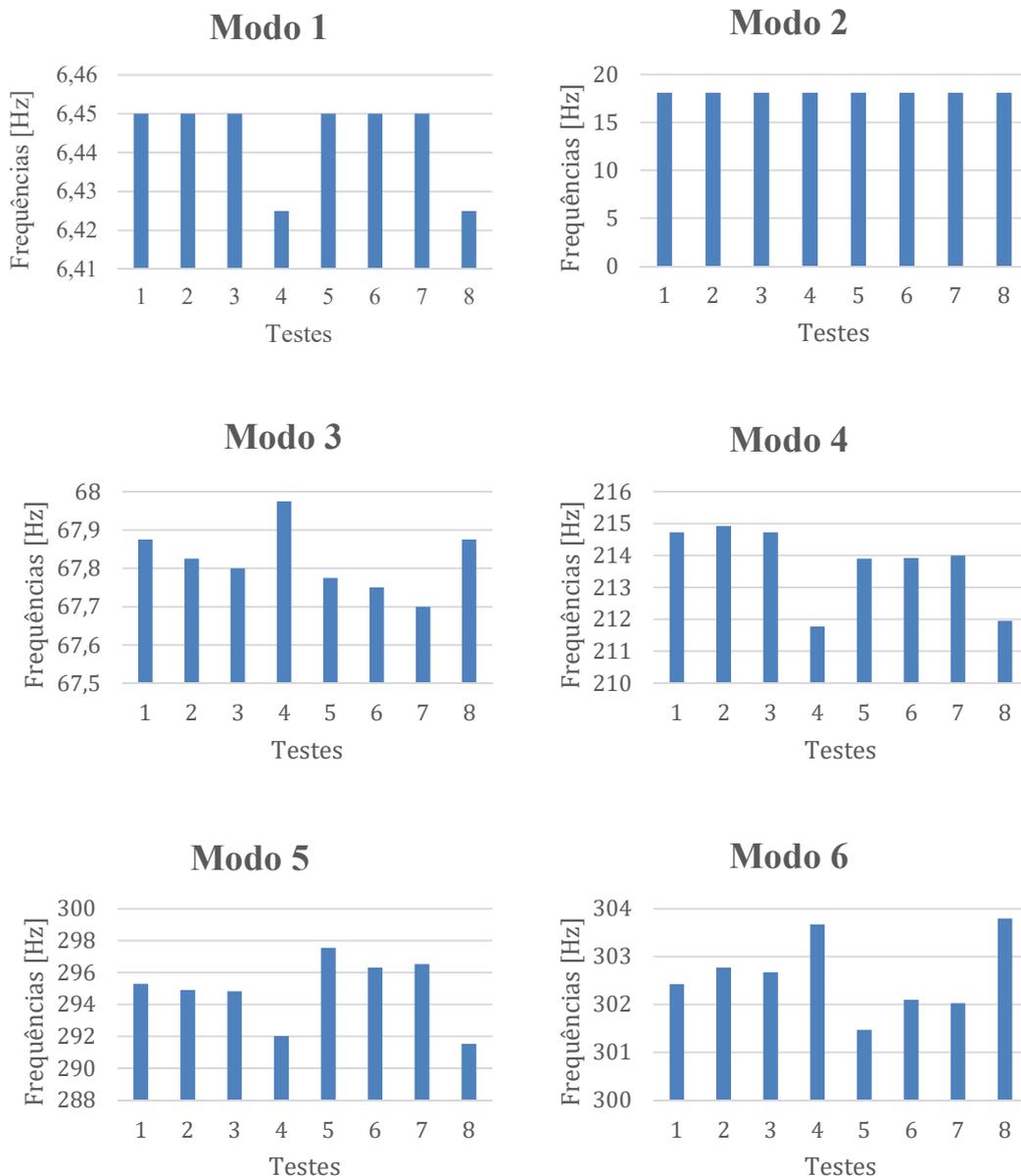
Configuração do teste		Frequências [Hz]									
Teste	Torque [N.m]	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo 7	Modo 8	Modo 9	Modo 10
1	6	6,450	18,125	67,875	214,725	295,300	302,425	321,675	807,225	837,450	874,425
2	8	6,450	18,125	67,825	214,925	294,900	302,775	321,175	807,25	838,025	873,55
3	10	6,450	18,125	67,800	214,725	294,825	302,675	321,300	806,625	837,675	873,725
4	Junta afrouxada	6,425	18,125	67,975	211,775	292,025	303,675	320,800	803,475	839,550	873,025
5	10	6,450	18,125	67,775	213,900	297,550	301,475	322,325	809,525	835,875	875,125
6	8	6,450	18,125	67,750	213,925	296,325	302,100	321,475	808,55	836,800	873,95
7	6	6,450	18,125	67,700	214,000	296,525	302,025	321,3	808,675	836,100	873,75
8	Sem junta parafusada	6,425	18,125	67,875	211,95	291,525	303,800	320,675	802,150	839,350	872,75

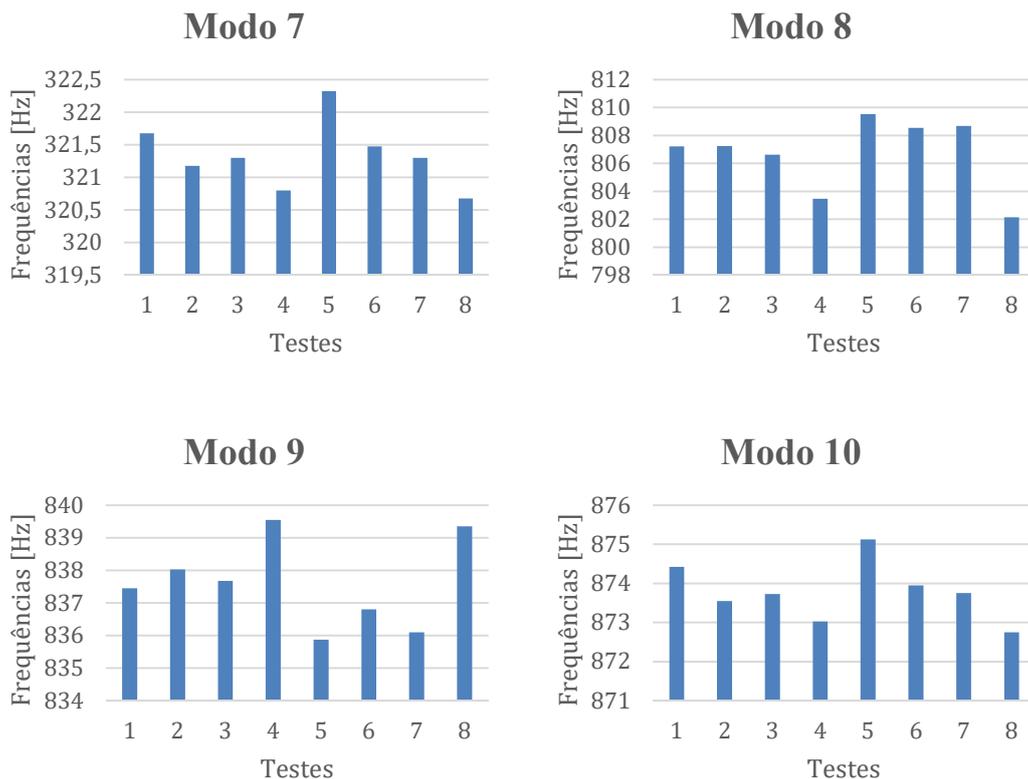
Fonte: Próprio Autor.

Para fins de comparação e identificação de possíveis padrões causados pela alteração do torque de aperto aplicado a junta parafusada por meio da frequência de ressonância da

estrutura, foi elaborada a Tabela 4, na qual são apresentados os valores de pico das curvas geradas pelo código MatLab provenientes do sensor do 1º andar, para todos os testes, estes podem ser visualizados no gráfico da Figura 16. Estima-se que esses valores possam representar os primeiros 10 modos de vibração da estrutura, porém sabe-se que os testes estão sujeitos a ruídos, portanto não é possível confirmar que todos esses picos encontrados no sinal realmente são provenientes somente de frequências da estrutura metálica do teste. A seguir, são apresentados gráficos provenientes da tabela 4, para uma melhor visualização dos padrões observados.

Figura 19 – Gráficos dos Modos da Tabela 4





Fonte: Próprio Autor.

A partir destes dados, é possível identificar alguns padrões das repostas que serão discutidos a seguir. Primeiramente, algo de fácil detecção é a alteração no valor dos sinais para os testes 4 e 8 para maioria dos modos de vibração, o que já era previsto pois no teste 4 não há aplicação de torque na junta e no teste 8 não há a presença da junta, o que afeta a rigidez da estrutura. Algo interessante é que para os modos de vibração 3, 6 e 9, a frequência encontrada para os testes 4 e 8 foi maior do que para os outros testes, enquanto para os modos 1, 4, 5, 7, 8 e 10, estes testes apresentaram o menor valor de frequência. Estes dados podem ser visualizados na Figura 18, comparando as curvas dos testes 4 e 8 com as demais para os modos 5 e 6 de vibração e também nos gráficos apresentados na Figura 19. Esta análise mostre que, no presente estudo, a relação entre o torque aplicado e a frequência de ressonância encontrada não é diretamente proporcional para todos os modos examinados, ou seja, não se pode afirmar de maneira geral, que quanto maior o torque aplicado, maior a frequência de ressonância.

Outro fato notável é que os modos de vibração com frequências mais baixas sofrem pouco ou nenhum impacto com a alteração do torque da estrutura, o que se pode observar bem no modo 1 e 2, visíveis no gráfico da Figura 16 e nos gráficos da figura 19. Acredita-se que

estas frequências sofreriam alterações notáveis somente com uma alteração mais impactante na configuração da estrutura e que os modos de vibração com valores mais altos de frequência são mais sensíveis a pequenas alterações na estrutura, efeito que pode ser observado pelos gráficos das Figura 18 e 19.

Uma outra observação possível é que os testes com o mesmo valor de torque, 1 e 7, 2 e 6, e 3 e 5, apresentaram dados divergentes entre si. Este acontecimento traz luz ao fato de que o método utilizado para apertar os parafusos possui diversas inconsistências que podem ser responsáveis por essa divergência dos dados, pode-se ressaltar a imprecisão do torquímetro de estalo, o modo de travamento da porca presente no parafuso ao aplicar o torque.

6. Considerações finais e conclusão

Os estudos de monitoramento de saúde de estruturas (SHM) desempenham um papel fundamental na engenharia estrutural, e é notável o crescente interesse no desenvolvimento de novas técnicas e abordagens quanto ao monitoramento do torque em elementos de fixação. A importância reside na capacidade desses sistemas em proporcionar uma avaliação contínua e em tempo real da integridade dos elementos de fixação, contribuindo significativamente para a prevenção de falhas e o prolongamento da vida útil das estruturas. Ao monitorar o torque, é possível identificar variações indesejadas que podem indicar desgaste, corrosão ou outras condições adversas.

A técnica utilizada para monitorar o torque de aperto nos elementos de fixação adota no presente estudo consistiu na utilização de uma estrutura metálica de 2 graus de liberdade com junta parafusada, instrumentada com acelerômetros piezoelétricos acoplados a um sistema de aquisição de dados, posteriormente tratados por meio de uma função de resposta em frequência (FRF). Para a realização dos testes utilizou-se um martelo de impacto para excitar a estrutura, sendo que foram realizados testes para diferentes configurações de torque de aperto.

Diante do exposto, as análises realizadas permitem concluir que este método se mostrou efetivo. Visto que foi possível identificar pelas frequências de ressonância, alterações no torque de aperto da junta parafusada, com maior destaque para os testes em que os parafusos estavam totalmente afrouxados. Porém, nota-se que não foi possível encontrar um padrão para todas as configurações de torque e para todos os modos de vibração estimados.

Para estudos futuros, indica-se a realização dos testes com uma configuração que permita examinar uma faixa maior de torques de aperto, o desenvolvimento de um método mais preciso de aperto dos parafusos e a realização do teste em um ambiente mais controlado, com condições de temperatura e pressão constante, além de uma bancada de teste que seja menos suscetível às vibrações externas, buscando minimizar seu impacto nos resultados experimentais. Outra abordagem interessante seria realizar a simulação da estrutura por método de elementos finitos (FEM) com condições de cargas que simulem o torque de aperto nos parafusos da junta parafusada.

Referências

- ADAMS, D. Health monitoring of structural materials and components: methods with applications. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- AMERINI, Francesco; MEO, Michael. Structural health monitoring of bolted joints using linear and nonlinear acoustic/ultrasound methods. *Structural health monitoring*, v. 10, n. 6, p. 659-672, 2011.
- BICKFORD, John (Ed.). Handbook of bolts and bolted joints. CRC press, 1998.
- CHAKI, Salim et al. Combination of longitudinal and transverse ultrasonic waves for in situ control of the tightening of bolts. 2007.
- ERALIEV, Oybek; LEE, Kwang-Hee; LEE, Chul-Hee. Vibration-based loosening detection of a multi-bolt structure using machine learning algorithms. *Sensors*, v. 22, n. 3, p. 1210, 2022.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. Structural health monitoring: a machine learning perspective. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- GOYAL, Deepam; PABLA, B. S. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 23, p. 585-594, 2016.
- HE, K.; ZHU, W. D. Detecting loosening of bolted connections in a pipeline using changes in natural frequencies. *Journal of Vibration and Acoustics*, v. 136, n. 3, p. 034503, 2014.
- INDUFIX. Classe de resistência de parafusos. Disponível em: <<https://www.indufix.com.br/classe-de-resistencia-de-parafusos/>>. Acesso em: 2 jan. 2024.
- KAJIWARA, Itsuro et al. Loose bolt detection by high frequency vibration measurement with non-contact laser excitation. *Journal of System Design and Dynamics*, v. 5, n. 8, p. 1559-1571, 2011.
- KROT, Pavlo; KORENNOI, Volodymyr; ZIMROZ, Radoslaw. Vibration-based diagnostics of radial clearances and bolts loosening in the bearing supports of the heavy-duty gearboxes. *Sensors*, v. 20, n. 24, p. 7284, 2020.
- MALEKZADEH, M. et al. An integrated approach for structural health monitoring using an in-house built fiber optic system and non-parametric data analysis. *Smart Struct. Syst*, v. 14, n. 5, p. 917-942, 2014.
- MILANESE, A. et al. Modeling and detection of joint loosening using output-only broad-band vibration data. *Structural Health Monitoring*, v. 7, n. 4, p. 309-328, 2008.
- MIGUEL, Luccas P. et al. Probabilistic machine learning for detection of tightening torque in bolted joints. *Structural Health Monitoring*, v. 21, n. 5, p. 2136-2151, 2022.
- NIKRAVESH, Seyed Majid Yadavar; GOUDARZI, Masoud. A review paper on looseness detection methods in bolted structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 14, p. 2153-2176, 2017.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010.

- PARK, Jae-Hyung et al. Novel bolt-loosening detection technique using image processing for bolt joints in steel bridges. Incheon, Korea, sn, 2015.
- PUPIN, Josiana Rovatti; SILVA, Karina Schiabel; CARBONE, Vera Lúcia. Introdução às Séries e Transformadas de Fourier e Aplicações no Processamento de Sinais e Imagens. Trabalho (Conclusão de Curso) -Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- RAO, S. S. Vibrações mecânicas 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2008.
- RITDUMRONGKUL, Sapon et al. Quantitative health monitoring of bolted joints using a piezoceramic actuator–sensor. *Smart materials and structures*, v. 13, n. 1, p. 20, 2003.
- ROSIEK, M.; MARTOWICZ, A.; UHL, Tadeusz. An overview of electromechanical impedance method for damage detection in mechanical structures. Germany, sn, 2012.
- STRASER, Erik Gregory. A modular, wireless damage monitoring system for structures. Stanford University, 1998.
- SHIKI, S. B.; FRANCO, V. R. Application of low-cost instrumentation and output-only modal identification techniques for the structural health monitoring of mechanical systems. In: XLI Libero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. [S.l.: s.n.], 2020.
- TAKAHASHI, Ricardo HC. Transformada Discreta de Fourier: Motivação e Aplicações. Outubro, 2002.
- TANNER, Neal A. et al. Structural health monitoring using modular wireless sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 14, n. 1, p. 43-56, 2003.
- TITCHMARSH, E. C., Introduction to Fourier Integrals, Clarendon Press, Oxford, 1962.
- WANG, Tao et al. Review of bolted connection monitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 9, n. 12, p. 871213, 2013.

Apêndice A – Código Matlab para 1 Teste

```
clear;clc;close all;

fs = 3200;
block_size = fs*50;
nblock = 1;
thresh = 0.1;

f = [];
a1 = [];
a2 = [];

% Analisa arquivos de 1 a 10
for n = 1:10

    if n<10
        dados = importdata(['test_00',num2str(n),'.lvm'],'\t',24);
        dados = dados.data;
    else
        dados = importdata(['test_0',num2str(n),'.lvm'],'\t',24);
        dados = dados.data;
    end

    [ini] = impulsestartfinder(dados(:,2),thresh,block_size,nblock);

    f = [f;dados(ini:(ini+block_size-1),2)];
    a1 = [a1;dados(ini:(ini+block_size-1),3)];
    a2 = [a2;dados(ini:(ini+block_size-1),4)];
end

[H1,freq] = tfestimate(f,a1,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
[H2,~] = tfestimate(f,a2,boxcar(block_size),0,block_size,fs);

figure(1);
semilogy(freq,abs(H1),'b','linewidth',1.2);hold on;
semilogy(freq,abs(H2),'r','linewidth',1.2);
xlabel('Frequência [Hz]');ylabel('Magnitudo [g/N]');xlim([0 500]);
legend('1^o andar','2^o andar');
set(gca,'fontsize',10);grid on;box off;
```

Apêndice B – Código para Comparativo dos Testes 1º Andar

```
% Inicializa vetores para armazenar dados
f_all = cell(8, 1); % Cria uma célula para armazenar os vetores f de cada
conjunto
a1_all = cell(8, 1); % Cria uma célula para armazenar os vetores a1 de cada
conjunto

% Loop para todos os conjuntos de arquivos
for set_number = 1:8
    f = [];
    a1 = [];

    % Loop interno para os arquivos dentro de cada conjunto
    for file_number = 1:10
        n = (set_number - 1) * 10 + file_number; % Calcula o número do arquivo

        if n < 10
            dados = importdata(['test_00', num2str(n), '.lvm'], '\t', 24);
            dados = dados.data;
        else
            dados = importdata(['test_0', num2str(n), '.lvm'], '\t', 24);
            dados = dados.data;
        end

        [ini] = impulsestartfinder(dados(:,2), thresh, block_size, nblock);

        f = [f; dados(ini:(ini+block_size-1),2)];
        a1 = [a1; dados(ini:(ini+block_size-1),3)];
    end

    % Armazena os vetores f e a1 de cada conjunto
    f_all{set_number} = f;
    a1_all{set_number} = a1;
end

% Plotagem de todas as curvas em um único gráfico
figure;
hold on;

for set_number = 1:8
    [H1, freq] = tfestimate(f_all{set_number}, a1_all{set_number},
boxcar(block_size), 0, block_size, fs);
    semilogy(freq, abs(H1), 'linewidth', 1.2);
end

hold off;

xlabel('Frequência [Hz]);
ylabel('Magnitude [g/N]);
xlim([0 500]);
legend('Teste 1', 'Teste 2', 'Teste 3', 'Teste 4', 'Teste 5', 'Teste 6', 'Teste
7', 'Teste 8');
set(gca, 'fontsize', 10);
grid on;
box off;
```

