

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET
Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec

Rafael Faria Melo

**Monitoramento da integridade estrutural a partir de
sensoriamento de baixo-custo: Investigação de índices de dano
e de efeitos de variáveis ambientais**



São Carlos
2022

Rafael Faria Melo

**Monitoramento da integridade estrutural a partir de
sensoriamento de baixo-custo: Investigação de índices de dano
e de efeitos de variáveis ambientais**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

São Carlos

2022

*

Rafael Faria Melo

Monitoramento da integridade estrutural a partir de sensoriamento de baixo-custo: Investigação de índices de dano e de efeitos de variáveis ambientais/ Rafael Faria Melo. – São Carlos, 2022-

44p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET
Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec, 2022.

1. Sensoriamento de Baixo-Custo. 2. Monitoramento de Vibrações. 3. Manutenção Preditiva. 4. MEMS. 5. SHM. I. Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki. II. Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. III. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET. IV. Departamento de Engenharia Mecânica - DEMec. VI. Monitoramento da integridade estrutural a partir de sensoriamento de baixo-custo: Investigação de índices de dano e de efeitos de variáveis ambientais.



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 7/2022/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAFAEL FARIA MELO

**MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL A PARTIR DE SENSORIAMENTO DE BAIXO-CUSTO:
INVESTIGAÇÃO DE ÍNDICES DE DANO E DE EFEITOS DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 24 de março de 2022

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	Vitor Ramos Franco
Membro da Banca 2	Pedro de Campos Muradas Cerântola 



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 24/03/2022, às 09:35, 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 24/03/2022, às 09:38, 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 **0624316** e o código CRC **7D2674AF**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.006085/2022-91

SEI nº 0624316

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

Dedico este trabalho à minha família, professores e amigos que tornaram possível sua conclusão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais pela educação e ensinamentos ao longo de toda minha vida, me ensinando a ter responsabilidade e oferecendo suporte de todas as maneiras possíveis em minha caminhada e em minhas decisões. Aos meus irmãos por desde pequeno terem atuado como guias para o caminho percorrido e tutores em minhas dificuldades, além de serem fontes de inspiração. Aos meus avós e demais familiares que sempre demonstraram preocupação em me ver trilhando um caminho correto e que não mediram esforços para me apoiarem de diversas formas ao longo da minha trajetória.

Gostaria de agradecer também a todos os professores, desde aqueles que me ensinaram a ler até os que tive nestes últimos anos de graduação, que tornaram possível a conclusão de mais esta etapa em minha vida. Sem dúvida nada disso seria possível sem os inúmeros ensinamentos passados por vocês. Agradecimento especial ao Bruce, amigo, professor, orientador de iniciação científica, de estágio e do presente trabalho de conclusão de curso, não somente pelos ensinamentos, mas por toda a disposição, paciência e auxílio nas diversas atividades.

Por fim, agradeço a minha namorada, amigos de faculdade e de república por todos os momentos de descontração em churrascos, sociais, cinemas, Tuscas e demais festas, e também pelos estudos e trabalhos em grupo realizados durante estes anos de faculdade.

*"Sonhos determinam o que você quer.
Ação determina o que você conquista."*

Aldo Novak

RESUMO

Estruturas estão constantemente submetidas a entradas externas, sejam elas provenientes da aplicação de forças, ações do vento, variações de temperatura, entre outras, as quais podem gerar desgastes, ruídos e falhas. Por isso, técnicas de monitoramento da integridade estrutural vêm sendo cada vez mais aplicadas na atualidade. Nessa metodologia, sensores são implementados para a medição de vibrações e identificação de alterações nos parâmetros vibratórios geradas por essas entradas em tempo real, sendo possível prever e antecipar manutenções necessárias, o que aumenta a longevidade e a segurança dos sistemas. Entretanto, os sensores e placas de aquisição de dados utilizados atualmente apresentam um alto custo. Assim, foi realizada a instrumentação por meio de um sensor de baixo-custo, de origem microeletromecânica, em uma estrutura simples com 2 graus de liberdade, sob ação de vibrações geradas por uma entrada na forma de impacto, a fim de investigar índices de dano com base em variações de frequência natural, bem como identificar a influência de variáveis ambientais. Foram simulados danos na estrutura por meio de cortes em uma das vigas de sustentação e extraídos dados de frequência natural para diferentes condições ambientais e diferentes níveis de dano. Com relação aos efeitos de variáveis ambientais, constatou-se uma relação diretamente proporcional entre temperatura e frequências naturais, porém quase desprezível. Já com relação aos níveis de dano, foram observadas variações mais significativas de frequência à medida em que os danos aumentaram. Constatou-se que o sistema de aquisição implementado tem potencial para identificação de danos em estruturas e que variáveis ambientais podem influenciar nas frequências naturais determinadas. Nesse sentido, verificou-se a necessidade de se acompanhar variáveis ambientais durante o monitoramento estrutural para se obter uma identificação correta do estado do sistema.

Palavras-chave: Sensores de baixo-custo. Monitoramento de vibrações. Manutenção preditiva. MEMS. SHM.

ABSTRACT

Structures are constantly subjected to external inputs, such as the application of forces, wind actions, temperature variations, among others, which can generate wear, noise and failures. Hence, techniques for monitoring the structural integrity are being increasingly applied nowadays. In this methodology, sensors are implemented to measure vibrations and identify changes in vibration parameters generated by these inputs in real time, making it possible to predict and anticipate necessary maintenance, which increases the longevity and safety of systems in general. However, the sensors and data acquisition systems commonly used today demands intensive financial investment. Thus, an instrumentation was performed using a low-cost sensor, of microelectromechanical origin, in a simple structure with 2 degrees of freedom, under the action of vibrations generated by an impact-type input, in order to investigate damage indexes based on natural frequency variations, as well as identifying the influence of environmental variables present. It was simulated damage to the structure through cuts in one of the supporting beams and natural frequency data were extracted for different environmental conditions and different levels of damage. Regarding the effects of environmental variables, a directly proportional relationship between temperature and natural frequencies was found, although almost negligible. Regarding the damage levels, more significant frequency variations were observed as the damage increased. It was found that the implemented acquisition system is suitable to be used for damage detection in structures and that environmental variables can influence the determined natural frequencies. . In this sense, the need of measuring environmental variables during the structural monitoring was verified in order to obtain a correct identification of the true state of the system.

Keywords: Low-cost sensors. Vibration monitoring. Predictive maintenance. MEMS. SHM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Implementação de Técnicas de SHM.	16
Figura 2 – Exemplo de Uso de Acelerômetros para Aplicações em Grande Escala.	16
Figura 3 – Estrutura Projetada no <i>Software NX Siemens</i>	21
Figura 4 – Simulações Dinâmicas Realizadas.	22
Figura 5 – Estrutura de Testes Construída.	23
Figura 6 – Diagrama Esquemático Utilizado.	24
Figura 7 – Disposição dos Componentes para Realização dos Testes.	24
Figura 8 – Ciclo de Funcionamento da Rotina Elaborada.	26
Figura 9 – Marcações na Viga para Aplicação de Danos.	26
Figura 10 – Cenários de Condição de Dano na Viga.	27
Figura 11 – Resposta Temporal da Estrutura à Entrada Impacto Aplicada.	30
Figura 12 – Espectro em Frequência para Diferentes Condições Ambientais.	31
Figura 13 – Índices de Dano para Cada Condição do Ambiente.	32
Figura 14 – Espectro em Frequência para Diferentes Condições de Dano.	33
Figura 15 – Índices de Dano para Cada Cenário de Dano.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cenários de Condição de Dano da Viga.	27
Tabela 2 – Condições Ambientais no Cenário 1.	28
Tabela 3 – Frequências Naturais e Índices de Dano para Diferentes Condições Ambientais.	31
Tabela 4 – Frequências Naturais e Índices de Dano para Diferentes Condições de Dano.	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{n,desvio}$	Desvio da n-ésima frequência natural
$f_{n,base}$	Frequência natural de base
$f_{n,desc.}$	Frequência natural em um estágio desconhecido de dano
$X(\omega)$	Função no domínio da frequência
$x(k)$	Vetor de dados no domínio do tempo
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
	1.1 Objetivos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
	3.1 Projeto, Construção e Instrumentação da Estrutura de Testes	21
	3.2 Implementação de Rotina para Medição e Processamento dos Dados	25
	3.3 Investigação de Índices de Dano e Efeitos de Variáveis Ambientais...	26
	3.4 Processamento de Sinais para Extração de Índices de Dano	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
	4.1 Investigação de Efeitos de Variáveis Ambientais	30
	4.2 Investigação de Índices de Dano.....	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36
	APÊNDICE A – ROTINA COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO.....	39

1 INTRODUÇÃO

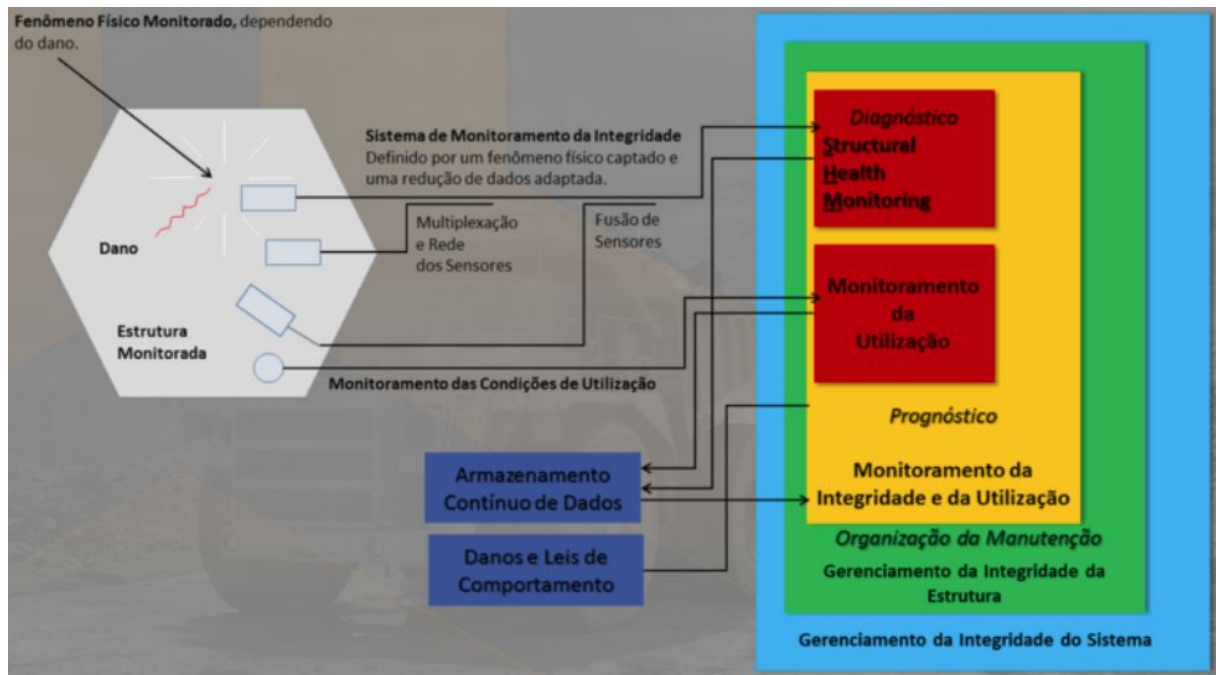
Diversas investigações foram motivadas pela ocorrência do fenômeno de vibrações mecânicas na engenharia, como no projeto de máquinas e estruturas, dinâmica de motores e sistemas de controle, uma vez que ele pode ser causador de desgastes, ruídos e falhas (RAO, 2017). O monitoramento da saúde de estruturas, do inglês *Structural health monitoring* (SHM), é um conceito que tem se popularizado no âmbito de análise desse fenômeno e dos efeitos que ele pode gerar. Segundo Farrar e Worden (2012), SHM consiste na implementação de estratégias para detecção de danos em estruturas aeroespaciais, civis e mecânicas, as quais são de grande importância para a sociedade e estão constantemente submetidas a esforços e ações das intempéries climáticas. Rytter (1993) descreve este processo de monitoramento por meio de cinco principais etapas. São elas:

1. Identificação da presença de danos na estrutura;
2. Determinação da localização geométrica do dano;
3. Estabelecimento do tipo de dano existente;
4. Quantificação da gravidade do dano;
5. Previsão do tempo de vida útil restante do sistema.

Assim, após determinado o estado de dano do sistema, é possível elaborar planos de manutenção e implementar medidas para que ele permaneça seguro para uso da sociedade. Giurgiutiu (2014) afirma que por meio do monitoramento da integridade estrutural, a manutenção programada pode ser substituída pela manutenção conforme necessidade, economizando, assim, o custo de intervenções desnecessárias e maximizando a disponibilidade desses sistemas.

Na Figura 1, é apresentado um diagrama esquemático da técnica de SHM, abordando desde a etapa de medição dos danos existentes e monitoramento das condições de utilização da estrutura, os quais são armazenados para análise contínua, até o gerenciamento da integridade do sistema, no qual se insere as manutenções realizadas quando é identificada necessidade. Nesse processo, o diagnóstico da presença de danos se dá por meio da captura de um fenômeno físico que indica alteração do sistema com relação ao seu estado de integridade de referência, sendo importante monitorar as condições de utilização para garantir que tais alterações são de fato ocasionadas por algum tipo de dano.

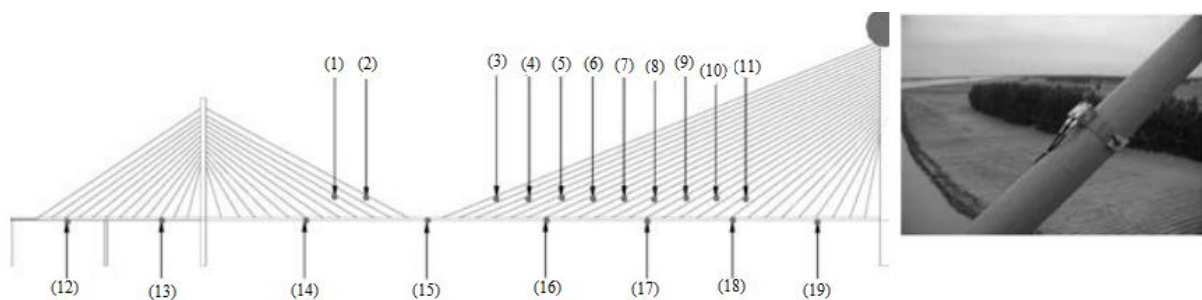
Figura 1 – Implementação de Técnicas de SHM.



Fonte: Adaptado de Balageas, Fritzen e Güemes (2010).

O monitoramento da integridade estrutural deve ser um processo não-destrutivo e idealmente implementado de forma online e automatizada durante a operação do sistema, permitindo acompanhar a evolução dos desgastes existentes e o desempenho dos componentes à medida em que os danos se acumulam (ADAMS, 2007). Para isso, geralmente são utilizados sistemas eletrônicos de alto custo, compostos por acelerômetros piezoelétricos e placas de aquisição de alto desempenho, os quais muitas vezes são financeiramente inviáveis de serem aplicados em grande escala. Na Figura 2, é apresentado um exemplo de aplicação de acelerômetros piezoelétricos para monitoramento da integridade de uma ponte, em que foram distribuídas 19 unidades ao longo de uma ponte estaiada (LI et al., 2006). A grande quantidade de sensores necessária para o acompanhamento dessas estruturas muitas vezes faz com que seja inviável a aplicação em larga escala de técnicas SHM.

Figura 2 – Exemplo de Uso de Acelerômetros para Aplicações em Grande Escala.



Fonte: Li et al. (2006).

Dessa forma, com o intuito de tornar mais acessível a implementação de técnicas de SHM, no presente estudo, foi utilizado sensoriamento de baixo-custo para esta aplicação, constituído por um acelerômetro do tipo MEMS, do inglês *Microelectromechanical Systems*, e por uma placa de prototipagem rápida com tecnologia de comunicação *wi-fi*. Mahalik, Iyuke e Ahn (2006) definem MEMS como sendo pequenos dispositivos que combinam elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos, e que possuem um custo relativamente baixo, quando comparados aos sensores piezoelétricos. No experimento realizado, foram aplicados danos progressivos em uma estrutura de testes de dois andares instrumentada por este sistema de aquisição e, a partir de dados de aceleração medidos na estrutura sob entradas na forma de impacto, desvios de frequência natural do sistema foram usados como indicadores da presença de dano. Utilizando a tecnologia *wi-fi* da placa, os valores de frequência natural calculados foram enviados a uma plataforma em nuvem, o que permite o monitoramento de suas variações de forma remota e em tempo real.

Além disso, de acordo com Farrar e Worden (2012), as condições ambientais das estruturas também são grandes empecilhos na implementação do monitoramento da integridade estrutural. É preciso diferenciar os reais danos existentes nos sistemas daquelas variações de parâmetros modais geradas pela flutuação dessas variáveis ambientais. Assim, no presente estudo também foram monitoradas temperatura e umidade ambiente e extraídas frequências naturais em diferentes momentos do dia, a fim de observar os desvios nos parâmetros modais gerados tanto pelos danos aplicados na estrutura quanto pelas variações da condições ambientais.

1.1 Objetivos

Dado o contexto apresentado, destaca-se como objetivo geral do presente estudo a investigação dos índices de dano de uma estrutura de dois andares construída em pequena escala e dos efeitos de variáveis ambientais no sistema, utilizando sensoriamento de baixo-custo.

São ainda objetivos específicos do trabalho de conclusão de curso:

- Aplicar sensoriamento de baixo-custo para monitoramento da integridade estrutural do sistema, extraindo informações de frequência natural e identificando os índices de dano;
- Investigar os efeitos de variações de temperatura e umidade nos índices de dano da estrutura;
- Verificar a possibilidade de utilização de acelerômetros de baixo-custo em sistemas de monitoramento de integridade estrutural.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Diversas técnicas podem ser utilizadas para a identificação de danos em estruturas e sistemas, baseando-se no monitoramento de determinado parâmetro que varia conforme sua integridade. O presente estudo foca na determinação de danos por meio do monitoramento de parâmetros vibratórios, mas outros parâmetros e técnicas como a impedância eletromecânica (PALOMINO et al., 2008), emissão acústica (HOLFORD, 2009) e correlação de imagens digitais (NIEZRECKI; BAQERSAD; SABATO, 2018) também são alternativas para o monitoramento da integridade estrutural.

No passado, a maioria das aplicações de técnicas de monitoramento da integridade estrutural era realizada utilizando-se sistemas de aquisição de alto custo e de difícil implementação, visto que a tecnologia de acelerômetros de baixo-custo com potencial para aplicações em SHM, como os acelerômetros MEMS, é relativamente recente. Atualmente, tem crescido o interesse em realizar o monitoramento da saúde de estruturas por meio da análise de suas respostas dinâmicas extraídas via acelerômetros MEMS (SABATO; NIEZRECKI; FORTINO, 2016).

No contexto de trabalhos que utilizaram sensoriamento de baixo-custo para monitoramento de vibrações em estruturas, Beskhyroun e Ma (2012) avaliaram a utilização de sensores do tipo MEMS como forma economicamente viável para detecção de danos em estruturas civis submetidas a terremotos. Os acelerômetros modelo X6-1A foram usados para medir as respostas aos abalos sísmicos e, a partir disso, foi possível determinar as frequências naturais, o amortecimento e os modos de vibração das estruturas testadas com acuracidade, obtendo valores de correlação por meio do critério MAC (do inglês, *Modal Assurance Criterion*) acima de 0,8. Ozer e Feng (2016) utilizaram acelerômetros presentes em um *smartphone* para extração de parâmetros modais de uma ponte para pedestres e chegaram a resultados próximos daqueles obtidos por meio de um sistema de referência composto por acelerômetros piezoelétricos, validando o sistema utilizado. Andò, Baglio e Pistorio (2014) desenvolveram um sistema de monitoramento sem fio, conhecido como *wireless sensor networks* (WSN), capaz de acompanhar a integridade de estruturas em tempo real. O mesmo foi constituído por inclinômetros e acelerômetros de baixo-custo. Realizando experimentos em escala laboratorial, os autores validaram a utilização do sistema para monitoramento de vibrações. Ribeiro e Lameiras (2019) avaliaram seis diferentes modelos de acelerômetros MEMS durante a medição de vibrações em um modelo de estrutura de três andares excitado por um ventilador. Os autores compararam as frequências naturais e modos de vibração determinados de forma experimental com modelos de referência e concluíram que os sensores utilizados são opções para o monitoramento da saúde de estruturas.

Segundo Zou, Tong e Steven (2000), por meio da análise de alterações nas respostas dinâmicas dos sistemas, é possível não somente identificar a ocorrência de dano, mas também determinar sua magnitude, posição e severidade. Ratcliffe et al. (2008) monitoraram a vibração

de um estabilizador de avião utilizando acelerômetros MEMS modelo ADXL202. Por meio de técnicas que possibilitaram quantificar a variação da rigidez da estrutura, os autores mapearam as regiões nas quais houve alterações nas respostas dinâmicas do estabilizador e concluíram que, embora esses sensores de baixo-custo apresentem ruídos na medição, eles são alternativas viáveis para detecção de danos em sistemas. Também utilizando técnicas de captação de alteração na rigidez de sistemas, Lu et al. (2008) validaram o uso de um sistema *wireless*, capaz de detectar danos em tempo real, em uma estrutura de concreto que foi simulada sob efeito de abalos sísmicos, por meio de uma plataforma vibratória.

Shiki e Franco (2020) monitoraram a integridade de uma estrutura que representava um edifício de dois andares em escala reduzida, por meio de um acelerômetro ADXL335 e uma placa de prototipagem rápida. Foram aplicados danos progressivos e investigada a influência destes na variação das frequências naturais da estrutura. Ao final, os autores concluíram que é viável a utilização de instrumentação de baixo-custo como alternativa para técnicas de SHM. Quqa, Landi e Diotallevi (2019) testaram sensores MEMS de baixo-custo para extração das frequências naturais de um prédio em escala laboratorial e observaram que eles são capazes de extrair parâmetros modais com grande acurácia. Além disso, assim como realizado no presente estudo, os autores armazenaram as informações de frequência natural em uma plataforma de armazenamento em nuvem para que, analisando os desvios de frequência com relação a uma referência ao longo do tempo, acompanhassem a evolução dos danos.

Já no que se refere aos efeitos de variáveis ambientais no monitoramento da integridade estrutural, um problema crítico é a diferenciação das variações de propriedades inerentes do sistema e seu entorno dos potenciais danos a serem detectados (DERAEMAERKER; PREUMONT; KULLAA, 2006). Baeßler et al. (2019) propuseram a utilização de modelos físicos para computar os efeitos de variáveis ambientais nas respostas das estruturas monitoradas. Em seus estudos, os autores analisaram a influência da temperatura e o comportamento térmico estrutural de uma ponte e concluíram que ter mais conhecimento sobre o comportamento do material afetado por condições ambientais é crucial para o uso de estratégias de SHM. Xia et al. (2006) investigaram a influência de variações de temperatura e umidade nos parâmetros modais de uma laje de concreto ao longo de dois anos e constataram uma relação inversamente proporcional entre esses parâmetros ambientais e as frequências de vibração da estrutura, sendo a variação do módulo de elasticidade da laje a causa primária para as flutuações dos parâmetros modais. Wood (1992) realizou uma série de testes em uma ponte e constatou forte relação entre a resposta em frequência do sistema e a temperatura. No estudo, identificou-se a variação do módulo de elasticidade do asfalto gerado pelas condições ambientais como sendo a maior causa para alterações na rigidez da estrutura e, conseqüentemente, nas frequências naturais de vibração.

Para estudo do efeito não somente da temperatura, mas de outras condições ambientais, como umidade e ação de ventos, Doebling e Farrar (1997) realizaram uma análise temporal da influência destas variáveis nos parâmetros modais de uma ponte e notaram uma oscilação de até

5% na primeira frequência natural da estrutura em um ciclo de 24 horas. Ubertini et al. (2017) investigaram a correlação entre os parâmetros ambientais e as frequências naturais de uma torre utilizando sensores de temperatura e umidade. Verificou-se que a temperatura apresenta uma correlação mais forte do que a umidade, sendo que, para condições de congelamento, ocorreu um aumento dos valores de frequência à medida em que a temperatura diminuía. Os autores concluíram que os efeitos da temperatura precisavam ser removidos em situações nas quais as frequências naturais são utilizadas como parâmetro para avaliação da saúde de estruturas, sendo técnicas de regressões lineares multivariadas alternativas eficazes para este propósito.

Dadas todas as referências apresentadas, além dos vários outros estudos recentes acerca do tema, nota-se o interesse e a relevância de se realizar novas descobertas e validações com relação ao monitoramento da integridade de estruturas. Conforme apresentado anteriormente, a utilização de sensores MEMS tem se mostrado como uma alternativa viável para técnicas de SHM, apresentando bons resultados no que refere à extração de parâmetros modais e identificação de danos. Com relação aos efeitos de variáveis ambientais, observa-se a importância de considerá-los como possíveis geradores de desvios de frequência natural, sendo necessário analisar não somente os parâmetros modais em si durante o monitoramento da saúde de estruturas, mas também as condições do ambiente, como variações de temperatura e umidade.

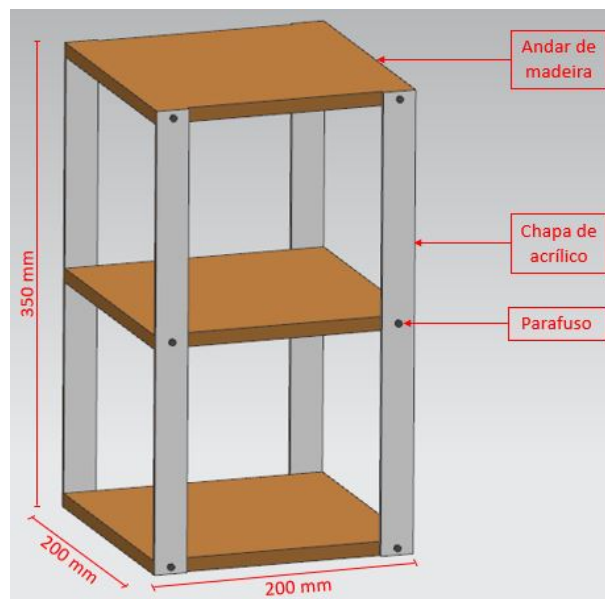
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista o contexto de pandemia de Covid-19, os experimentos de monitoramento da integridade estrutural e avaliação de índices de dano e efeitos de variáveis ambientais foram realizados em um ambiente fora da universidade. Para tal, fez parte do presente trabalho o projeto e construção de uma estrutura de testes de dois andares, a instrumentação desta com o *hardware* de baixo-custo, a implementação do código computacional para medição e envio de dados de frequência natural para uma plataforma em nuvem e a realização dos testes. Foi simulada a propagação de danos na estrutura e investigados os efeitos destes e de variações das condições ambientais nas frequências naturais do sistema, parâmetro utilizado como indicador de danos.

3.1 Projeto, Construção e Instrumentação da Estrutura de Testes

Para a realização desta etapa, tomou-se como base a estrutura de testes construída por Shiki e Franco (2020). A estrutura projetada possui dois andares, totalizando uma altura de 350 mm e, com relação à largura e ao comprimento, ela apresenta uma seção quadrada de 200 mm de lado. Na base dos andares foram utilizadas placas de madeira cedro, com espessura de 30 mm, e, para constituir as 4 vigas de sustentação, foram utilizadas chapas de acrílico, de largura igual a 25 mm e espessura de 5 mm, fixadas por meio de parafusos. A utilização de tais materiais justifica-se pelo fato de apresentarem baixo custo e serem leves, facilitando o transporte da estrutura de testes, que será reutilizada para estudos futuros. Antes de construí-la, foi criado um modelo computacional por meio do *Software NX Siemens*, conforme apresentado na Figura 3.

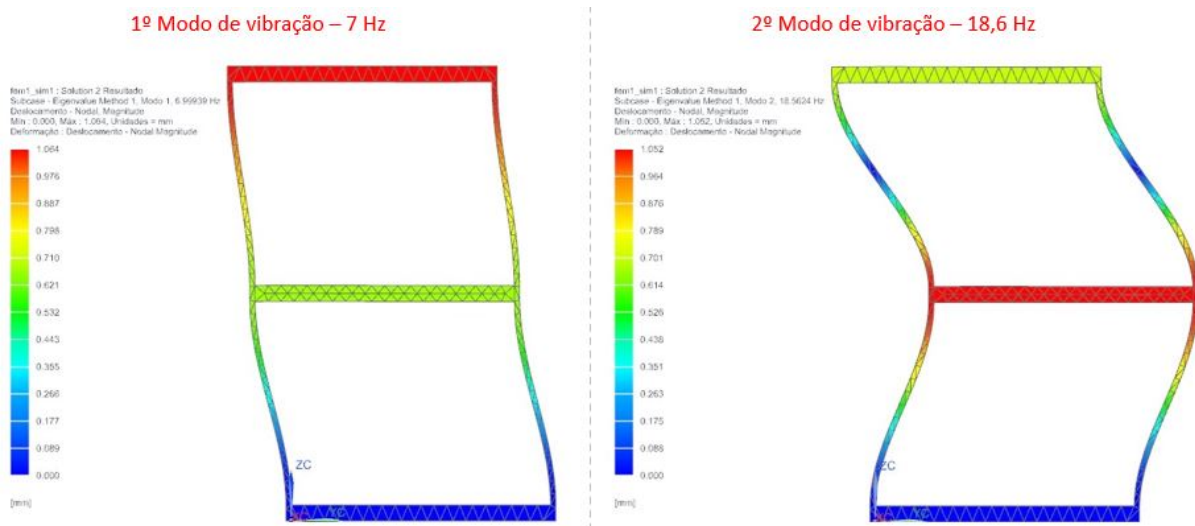
Figura 3 – Estrutura Projetada no *Software NX Siemens*.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Além disso, foi realizada uma simulação dinâmica para estimativa das frequências naturais e análise de esforços, a fim de verificar se as faixas de frequência estariam dentro do intervalo de medição do sistema de aquisição utilizado e se a estrutura teria resistência suficiente para a realização dos testes. Realizou-se uma análise estrutural por meio da SOL 103 *Real Eigenvalues* do *NX NASTRAN*, utilizando a biblioteca de propriedades dos materiais do próprio *software* e elementos de malha tetraédricos. Na Figura 4, são apresentados os resultados das simulações realizadas, nos quais constatou-se que as duas primeiras frequências naturais da estrutura deveriam estar próximas de 7 Hz e 18,6 Hz, frequências que se inserem no intervalo de medição do sistema. É importante destacar que, devido ao desconhecimento das propriedades exatas dos materiais, às condições do ambiente e outros efeitos ligados à montagem do sistema, não é esperado que as frequências naturais calculadas nos testes sejam exatamente iguais àsquelas obtidas nas simulações dinâmicas.

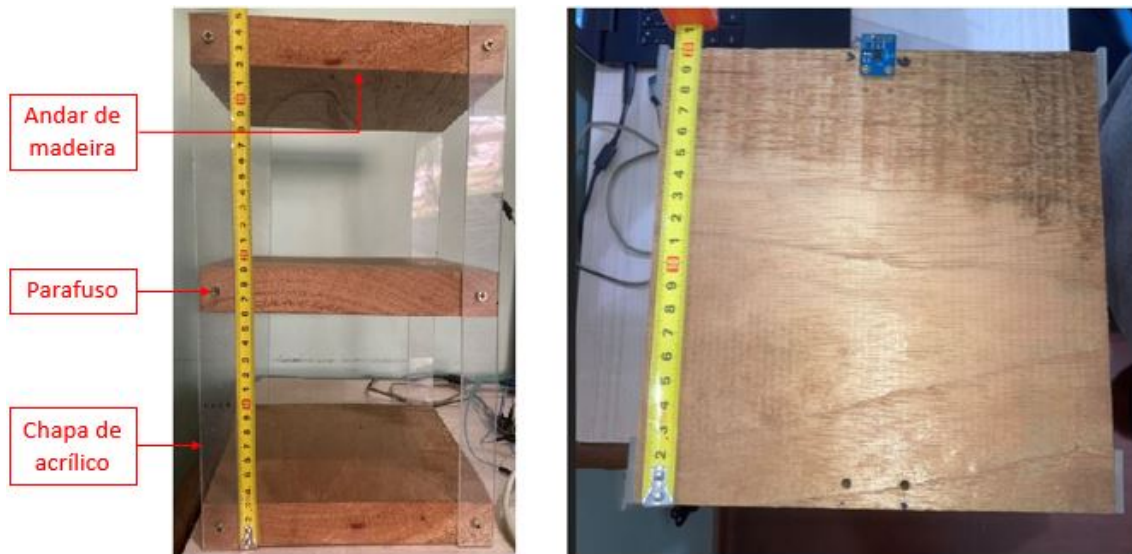
Figura 4 – Simulações Dinâmicas Realizadas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Posteriormente, certificando-se dos pontos já mencionados, a estrutura projetada foi construída, adquirindo a configuração final apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Estrutura de Testes Construída.



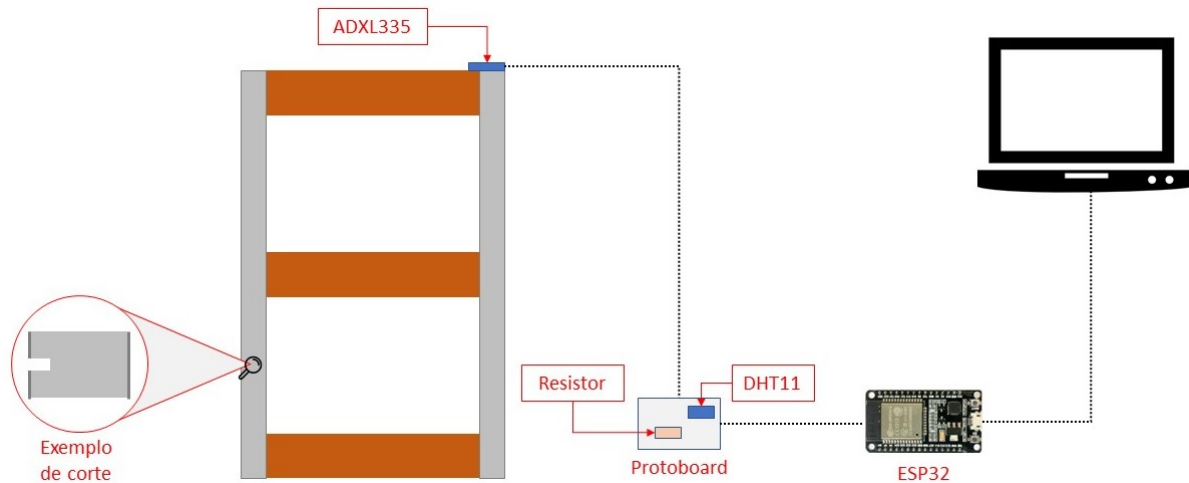
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O sistema de aquisição utilizado para realização das medições foi composto pelos seguintes itens:

- 1 acelerômetro triaxial ADXL335 (sensibilidade: 300 mV/g, faixa de medição: $\pm 3,6$ g de pico, faixa de frequência: até 1600 Hz);
- 1 sensor de temperatura e umidade DHT11 (faixa de medição de temperatura: 0 a 50 °C, faixa de medição de umidade: 20 a 90% UM, resolução: 16 bits);
- 1 resistor de 10K Ω , para limitar a corrente elétrica direcionada para o sensor de temperatura e umidade;
- 1 *proto board*, para conexão do sensor de temperatura e umidade e do resistor;
- 1 Placa de prototipagem ESP32-WROOM-32 (18 pinos analógicos, resolução: 12 bits);
- *Jumpers* para conexão dos componentes à placa de prototipagem.

O acelerômetro foi fixado na parte superior do segundo andar da estrutura e o sensor de umidade se manteve fixo ao lado desta, assim como a placa de prototipagem rápida. A Figura 6 ilustra o diagrama esquemático utilizado nos testes, com um exemplo de corte feito em uma das vigas para simulação de danos na estrutura, permitindo a extração de dados de frequência natural para diferentes níveis de dano.

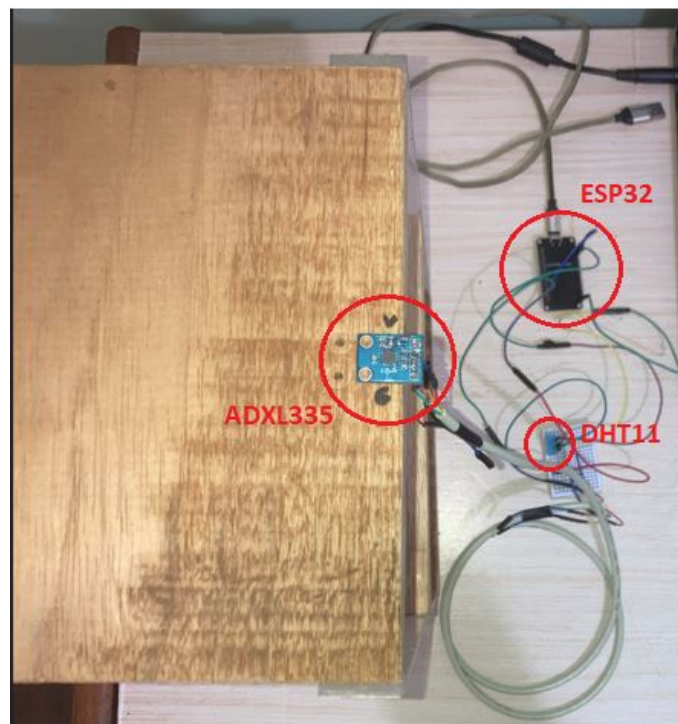
Figura 6 – Diagrama Esquemático Utilizado.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 7, é possível visualizar a disposição dos componentes para a realização dos testes.

Figura 7 – Disposição dos Componentes para Realização dos Testes.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O funcionamento do ADXL335, acelerômetro de origem capacitiva, baseia-se na tradução de um sinal externo de aceleração em um deslocamento correspondente de sua massa móvel, também conhecida como massa inercial ou de prova (TEVES, 2013). Tal deslocamento causa um desbalanceamento do capacitor diferencial presente no dispositivo, o que resulta na geração

de um sinal analógico cuja amplitude é proporcional à aceleração identificada. Ainda de acordo com o autor citado, as principais vantagens dos acelerômetros de origem capacitiva são a alta sensibilidade, baixo nível de ruído e baixo consumo de energia.

Já no que se refere ao sensor de temperatura e umidade, para medição de dessa segunda variável, este componente, modelo DHT11, possui um elemento sensor de umidade capacitivo, constituído por dois eletrodos com um substrato de retenção de umidade como um dielétrico entre eles. Assim, alterações na umidade do ambiente geram mudanças no valor de capacitância do sensor, a qual é convertida para um formato digital de percentual de umidade no ambiente. Já para medição de temperatura, o DHT11 conta com um termistor de coeficiente de temperatura negativo, que identifica variações de temperatura por meio da alteração de sua resistência elétrica, a qual é convertida para um sinal digital, fornecendo informações de temperatura em graus Celsius. Segundo Srivastava, Kesarwani e Dubey (2018), seu tamanho pequeno, baixo consumo de energia e transmissão de sinal de até 20 metros, tornam o DHT11 a melhor escolha para várias aplicações, incluindo as mais exigentes.

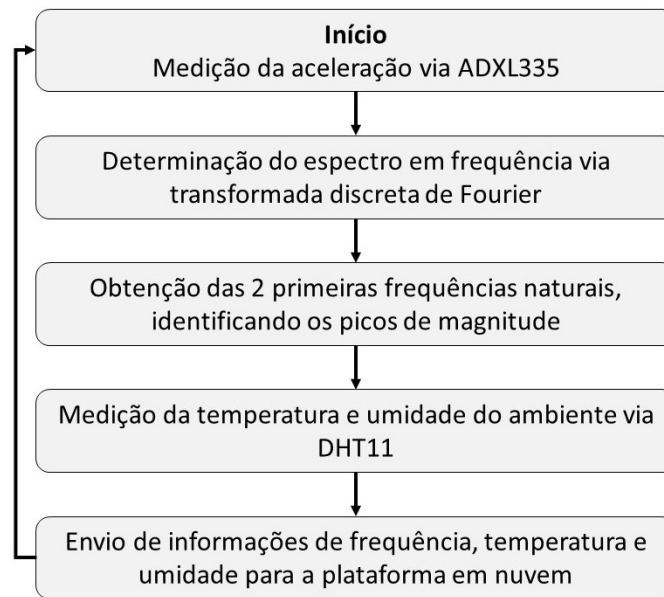
3.2 Implementação de Rotina para Medição e Processamento dos Dados

Para a implementação do código computacional na placa de prototipagem, utilizou-se o ambiente Arduino IDE, do inglês *Integrated Development Environment, software open-source* baseado na linguagem C++.

O código elaborado, que é apresentado no Apêndice A, é constituído tanto pela rotina de medição de aceleração, temperatura e umidade pelos sensores, quanto pela rotina de processamento de sinais, determinando as duas primeiras frequências naturais da estrutura a partir da captura dos picos de magnitude da FFT do sinal de aceleração. É importante destacar que ambas as rotinas foram processadas diretamente por meio da placa de prototipagem rápida ESP32, não sendo necessário um computador ou outro dispositivo com alta capacidade de processamento para tal. Com relação à rotina para aplicação da FFT em específico, foi utilizada a biblioteca *fft.h*, desenvolvida por Robin Scheibler. No que se refere aos parâmetros de medição do acelerômetro, adotou-se uma frequência de amostragem de 128 Hz e um intervalo de medição de 8 segundos, visto que as duas primeiras frequências naturais estudadas eram menores do que 64 Hz e que esse tempo de medição era suficiente para amortecer a entrada aplicada.

Além disso, embora não tenha sido o foco do presente estudo, o código apresenta também uma rotina de envio de dados de frequência natural, temperatura e umidade para a *ThingSpeak*, uma plataforma IoT de código aberto que permite o armazenamento de dados numéricos, os quais são inseridos ao longo do tempo em forma de gráficos, conferindo ao sistema desenvolvido a capacidade de monitoramento da integridade estrutural de maneira remota. Na Figura 8 é apresentado um fluxograma representativo do ciclo de captura dos dados, obtenção das frequências naturais e envio das informações para a plataforma em nuvem.

Figura 8 – Ciclo de Funcionamento da Rotina Elaborada.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

3.3 Investigação de Índices de Dano e Efeitos de Variáveis Ambientais

Nesta etapa, a fim de verificar tanto a influência dos danos aplicados na estrutura quanto do efeito das variações ambientais nos índices de dano, foi realizada uma série de medições de aceleração, temperatura e umidade.

Para investigação dos índices de dano, uma das vigas da estrutura foi serrada em 4 estágios progressivos de dano. Ao longo dos 25 mm de largura da viga, foram feitas marcações de 5 em 5 mm, conforme apresentado na Figura 9, para guiar a progressão dos cortes.

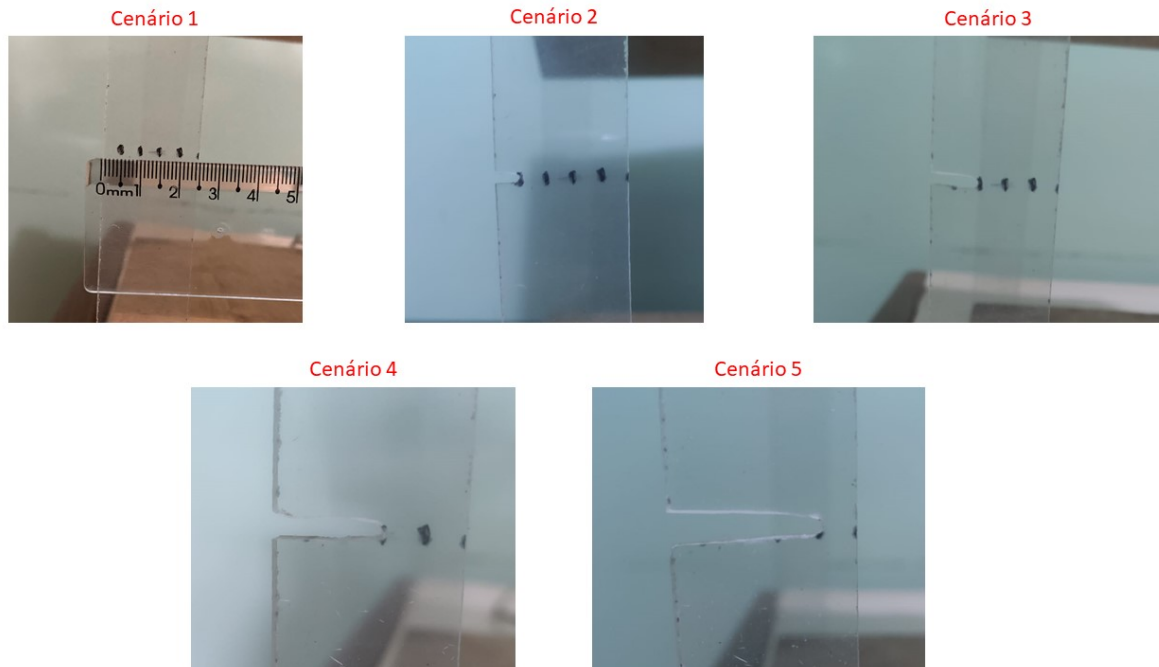
Figura 9 – Marcações na Viga para Aplicação de Danos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Com o auxílio de uma esmerilhadeira, a viga foi cortada de forma a simular a propagação de danos na estrutura, como pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 – Cenários de Condição de Dano na Viga.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Assim, foram analisados 5 cenários com diferentes condições de dano, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Cenários de Condição de Dano da Viga.

Cenário	Teste	Condição	Dano
1	1 -4	Intacta	Nenhum
2	5	Dano 1	Corte de 5 mm
3	6	Dano 2	Corte de 10 mm
4	7	Dano 3	Corte de 15 mm
5	8	Dano 4	Corte de 20 mm

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

No cenário 1, com a estrutura em sua condição base, sem nenhum dano, realizou-se quatro testes, em diferentes períodos do dia. Assim, foi possível extrair dados de frequência natural do prédio para diferentes condições de temperatura e umidade, as quais são apresentadas na Tabela 2. Comparando-se os desvios entre os valores de frequência, analisou-se a influência destas variáveis ambientais no sistema.

Tabela 2 – Condições Ambientais no Cenário 1.

Teste	Horário	Temperatura [°C]	Umidade Relativa [%]
1	16:53	29,7	60
2	13:04	27,2	58
3	21:42	25,9	73
4	6:50	23,4	86

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para cada um dos cenários de 2 a 5 foi realizado mais um teste, em condições ambientais semelhantes às do teste 3, podendo-se assim, descartar os efeitos da temperatura e umidade como causas para os possíveis desvios de frequência entre um cenário e outro.

Em cada teste, do 1 ao 8, foi aplicada uma entrada do tipo impacto com o auxílio de um martelo, com o objetivo de excitar a estrutura em uma ampla faixa de frequência. Segundo Schwarz e Richardson (1999), testes de impacto são uma maneira rápida, conveniente e de relativo baixo custo para obtenção de parâmetros vibratórios de sistemas. Os dados de aceleração medidos foram processados por meio da transformada discreta de Fourier, conforme apresentado na próxima seção, obtendo-se as 2 primeiras frequências naturais da estrutura.

3.4 Processamento de Sinais para Extração de Índices de Dano

Para processamento dos dados de aceleração medidos, no presente estudo foi utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), a qual consiste em um conjunto de algoritmos redescobertos por Cooley e Tukey (1965) que possuem a vantagem de apresentarem rápido processamento da transformada discreta de Fourier de uma amostra de dados. O uso desta técnica é justificado não somente por esse rápido processamento, necessário para o monitoramento das frequências em tempo real, mas também pelo fato dos algoritmos exigirem pouca capacidade de memória da placa de prototipagem.

Na Equação 1, é apresentada a transformada discreta de Fourier $X(\omega)$ do vetor de dados $x[k]$, a qual representa a transformação de um sinal no domínio do tempo, constituído por N amostras, para o domínio da frequência, obtendo o chamado espectro em frequência do sinal (BRACEWELL; BRACEWELL, 1986).

$$X(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-i(\frac{2\pi}{N})k\omega} \quad (1)$$

Com a FFT, o espectro em frequência de um sinal pode ser computado a partir da medição das saídas geradas por uma entrada imposta no sistema (HE; FU, 2001). No caso do presente estudo, foram aplicadas entradas na forma de impacto, as quais excitam o sistema em uma ampla faixa de frequência, permitindo a obtenção das frequências naturais através da identificação

dos picos de magnitude existentes. Conforme descrito na seção 3.2, tanto o processamento do algoritmo da FFT, quanto a identificação dos picos de frequência, foram realizados diretamente por meio da placa de prototipagem rápida utilizada.

No que se refere aos chamados índices de dano de uma estrutura, eles podem ser definidos como escalares extraídos a partir das medições realizadas, os quais indicam a existência ou não de danos no sistema. No presente trabalho, este índice corresponde ao desvio dos valores de frequência natural da estrutura analisada com relação àqueles estabelecidos como base, os quais representam a "ausência de danos". Segundo Farrar e Worden (2012), este é um dos índices baseados em vibração mais simples de serem extraídos, sendo justificado pelo fato de que este parâmetro modal mostra-se sensível à variações de rigidez dos sistemas. O cálculo do desvio da n -ésima frequência natural da estrutura ($f_{n,desvio}$) é feito por meio de:

$$f_{n,desvio}[\%] = 100 \left(\frac{f_{n,desc.} - f_{n,base}}{f_{n,base}} \right) \quad (2)$$

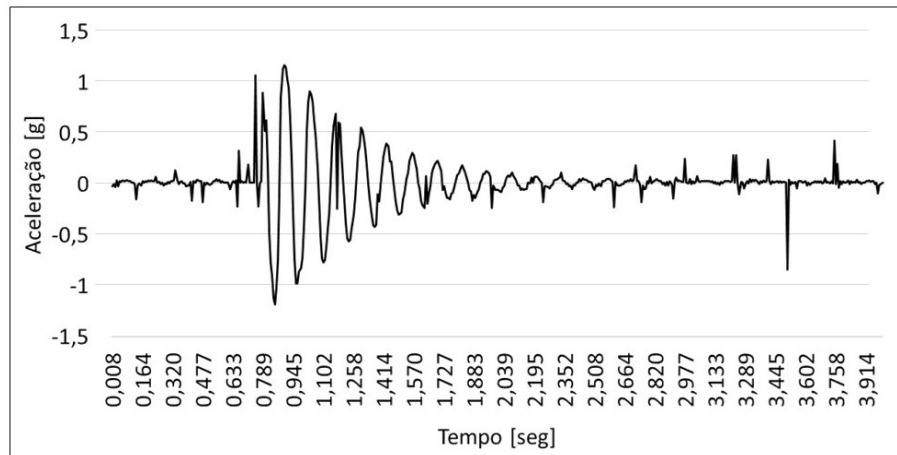
sendo $f_{n,desc}$ e $f_{n,base}$ correspondentes à frequência natural da estrutura em um estágio desconhecido de dano e à frequência natural de base utilizada para comparação, respectivamente. Assim, quanto maior o módulo de $f_{n,desvio}$ calculado, mais significativos esperam-se que sejam os danos identificados no sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito no último capítulo, os testes foram realizados primeiramente para 4 condições ambientais distintas, em um cenário sem existência de danos conhecidos e, posteriormente, em 5 diferentes cenários de dano, para condições ambientais semelhantes. Dessa forma, foi possível investigar tanto a influência da temperatura e umidade locais na variação das frequências naturais da estrutura, quanto os desvios de frequência gerados pela presença de danos.

Na Figura 11 é apresentada uma resposta temporal típica da estrutura quando aplicada a entrada impacto, desde o momento da aplicação até o atingimento do estado de repouso.

Figura 11 – Resposta Temporal da Estrutura à Entrada Impacto Aplicada.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

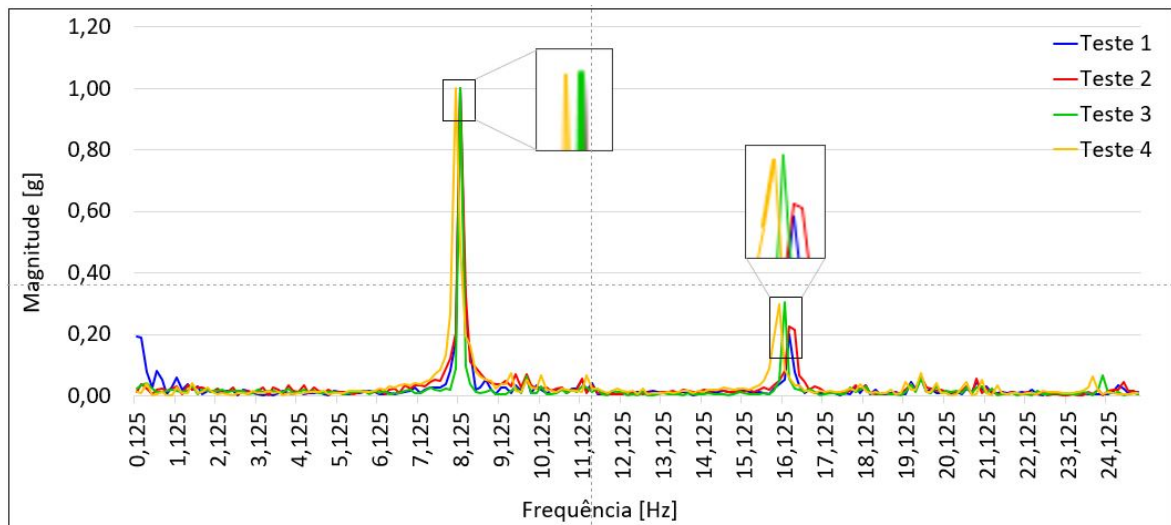
Observa-se a presença de alguns picos de aceleração além dos causados pela entrada imposta, provavelmente causados por ruídos e efeitos do sistema de aquisição utilizado. Apesar desses defeitos, sabe-se que tais inconsistências não exercem influência significativa no processamento da transformada de Fourier dos sinais.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos analisando-se primeiramente os efeitos de variáveis ambientais e, em seguida, os danos aplicados na estrutura.

4.1 Investigação de Efeitos de Variáveis Ambientais

Foram realizados 4 testes para análise dos efeitos de variações ambientais nas frequências naturais da estrutura, conforme apresentado na Tabela 2. Após processamento dos dados, extraiu-se os espectros em frequência da estrutura, os quais foram normalizados e delineados em um mesmo gráfico através do *Microsoft Excel*, para melhor efeito de comparação. Eles são apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Espectro em Frequência para Diferentes Condições Ambientais.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Nota-se que as condições do ambiente apresentaram pouca influência na primeira frequência natural da estrutura. Na segunda, percebe-se que para menores temperaturas, as frequências tenderam a valores mais baixos, dando indícios de relação direta entre os parâmetros, mesmo que quase desprezível.

Na Tabela 3 são apresentadas as frequências naturais determinadas em cada teste, bem como os índices de dano calculados considerando as condições ambientais do teste 3 como referência.

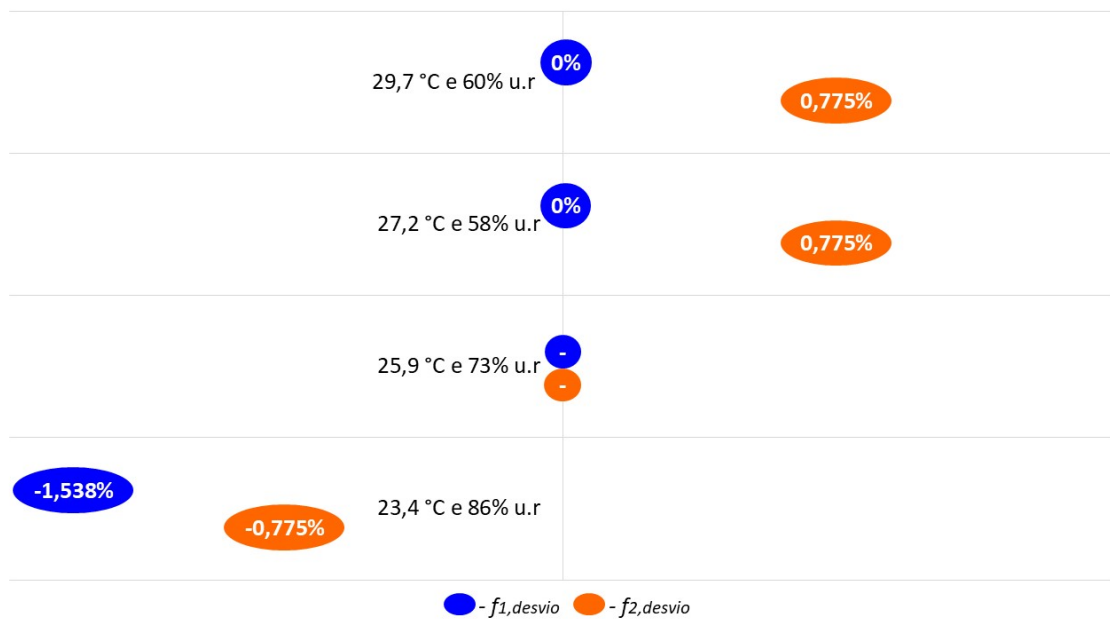
Tabela 3 – Frequências Naturais e Índices de Dano para Diferentes Condições Ambientais.

Teste	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	$f_{1,desvio}$ [%]	$f_{2,desvio}$ [%]
1	8,125	16,250	0	0,775
2	8,125	16,250	0	0,775
3	8,125	16,125	-	-
4	8,000	16,000	- 1,538	- 0,775

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 13 são apresentados os índices de dano para cada condição de temperatura e umidade, para efeito de comparação.

Figura 13 – Índices de Dano para Cada Condição do Ambiente.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

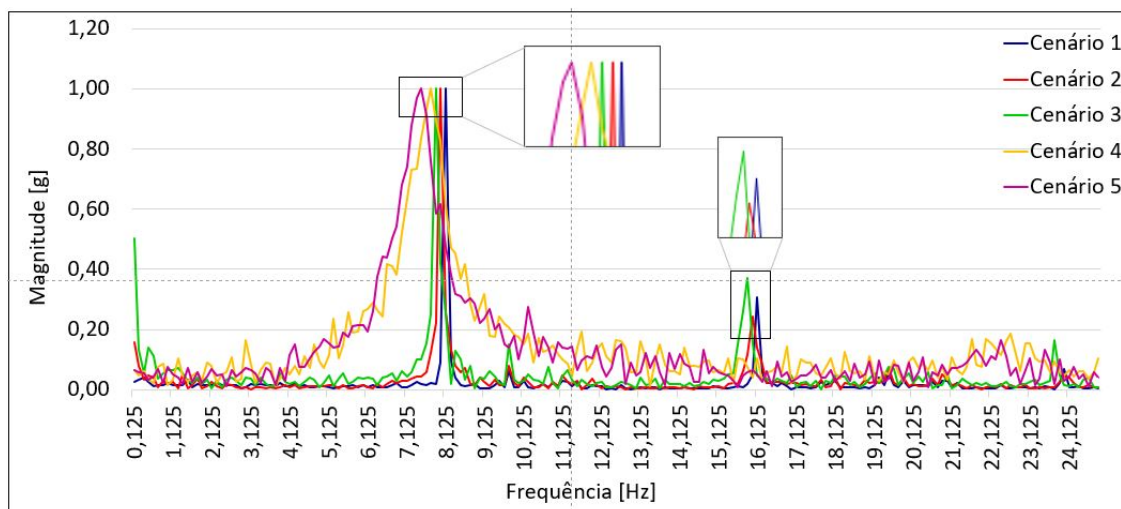
Nota-se que o maior desvio com relação ao estado de referência, igual a -1,538%, foi o da condição de temperatura e umidade iguais a 23,4 °C e 86% u.r, relativo à primeira frequência natural analisada.

4.2 Investigação de Índices de Dano

Conforme citado no Capítulo 3, foram analisados 5 cenários, cada qual com uma condição de dano distinta. Para minimização dos possíveis efeitos de variáveis ambientais no sistema, os cenários foram comparados entre si em condições semelhantes de temperatura e umidade, iguais àquelas apresentadas no teste 3 (25,9 °C e 73% de umidade relativa).

Na Figura 14, são apresentados os espectros em frequência da estrutura de testes para cada cenário, novamente normalizados e delineados em um mesmo gráfico para efeito de comparação.

Figura 14 – Espectro em Frequência para Diferentes Condições de Dano.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Nota-se que à medida em que os danos se tornaram maiores, as frequências naturais tenderam a diminuir, o que era esperado, visto a diminuição da rigidez da estrutura gerada pelos cortes na viga.

Com relação à primeira frequência em específico, observa-se uma redução gradativa de frequência de um cenário para cenário seguinte. Já no que se refere à segunda frequência natural analisada, o mesmo efeito é observado comparando-se os cenários 1, 2 e 3. Porém, a partir do quarto cenário, não foi identificado um segundo pico de frequência no intervalo analisado e constatou-se que o nível de ruído da FFT tornou-se mais significativo. Não foi possível identificar uma razão clara para este fenômeno, mas acredita-se que ele pode ter sido causado por alguma anormalidade elétrica no sistema, como mau contato ou variações na alimentação da placa.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de frequência natural obtidos e os índices de dano calculados, utilizando como base o cenário 1. Como não foram identificados picos claros de f_2 para os cenários 4 e 5, eles não foram inseridos na tabela.

Tabela 4 – Frequências Naturais e Índices de Dano para Diferentes Condições de Dano.

Cenário	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	$f_{1,desvio}$ [%]	$f_{2,desvio}$ [%]
1	8,125	16,125	-	-
2	8,000	16,000	- 1,538	- 0,775
3	7,875	15,875	- 3,077	- 1,550
4	7,750	N/A	- 4,615	N/A
5	7,500	N/A	- 7,692	N/A

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Por fim, na Figura 15 são apresentados os índices de dano para cada cenário de dano, para efeito de comparação.

Figura 15 – Índices de Dano para Cada Cenário de Dano.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os resultados obtidos indicam que o monitoramento da frequência natural com o sistema de aquisição utilizado é um caminho viável para a identificação de danos em estruturas, visto que quanto maior o dano existente, maior é o desvio com relação à frequência de base, apresentando um desvio máximo de -7,692% para o dano 4 aplicado.

Considerando-se as duas investigações realizadas, pode-se afirmar que o sistema de baixo-custo implementado apresenta potencial de ser aplicado para técnicas de SHM e, além disso, nota-se a importância de monitorar não somente os índices de dano da estrutura, mas também as condições ambientais em que ela se insere, uma vez que a temperatura e umidade podem ser causadoras de desvios de frequência, mesmo que de baixa intensidade ou sem afetar todas as frequências naturais analisadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi motivado pelo crescente interesse em aplicação de técnicas de monitoramento da integridade de estruturas, dado o desenvolvimento tecnológico e popularização de dispositivos MEMS nos últimos anos. Tais técnicas podem contribuir tanto para a redução de custos com manutenção em estruturas e sistemas, quanto para a garantia de segurança aos usuários, trazendo benefícios econômicos e sociais. A utilização de sistemas de aquisição de baixo-custo tem se mostrado uma alternativa viável para implementação de SHM e diversos autores realizaram experimentos buscando validar dispositivos e determinar suas limitações.

Dada a relevância do tema, neste trabalho foram realizados testes com um acelerômetro MEMS, modelo ADXL335, e um sensor de temperatura e umidade, modelo DHT11, em um prédio de dois andares em escala reduzida, submetido a entradas na forma de impacto. Foram avaliados os desvios das duas primeiras frequências naturais da estrutura à medida em que as condições do ambiente mudavam e danos eram aplicados em uma das vigas de sustentação. Além disso, os dados de frequência natural, temperatura e umidade foram enviados a uma plataforma de armazenagem em nuvem, permitindo o monitoramento destes parâmetros em tempo real e de forma remota.

No que se refere aos efeitos de variáveis ambientais, constatou-se que variações de temperatura e umidade podem ser causadoras de alterações nas frequências naturais de estruturas, embora no experimento realizado tenha sido de maneira pouco significativa e não necessariamente nas duas frequências monitoradas. Novos estudos em ambientes controlados, nos quais é possível variar apenas uma condição do ambiente e manter as demais inalteradas, são possibilidades futuras para se adquirir maior conhecimento sobre a influência de variáveis ambientais nas frequências de vibração. Com relação aos índices de dano gerados pela aplicação de danos à estrutura, observou-se uma redução nos valores de frequência natural conforme os danos aplicados se tornavam maiores, o que está em conformidade com a literatura da área, visto a redução da rigidez do sistema, além de variação de massa e amortecimento.

Dessa forma, é possível concluir que o sistema de aquisição utilizado apresenta potencial para aplicações de SHM, sendo importante monitorar não somente as variações de frequência natural, mas também as condições ambientais, para certificação de que tais variações observadas sejam de fato resultados da presença de danos. Estudos futuros em estruturas de maior escala e durante suas operações, comparando o desempenho dos componentes utilizados no presente trabalho com o de sistemas de referência podem ser próximos passos para a validação do sistema de aquisição utilizado. Além disso, novos experimentos considerando a aplicação de técnicas como a utilização de rede de sensores, extração de médias e análises estatísticas para tratamento dos dados medidos também são alternativas para minimização de erros ou problemas de medição e que podem contribuir para o monitoramento da integridade de sistemas.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, D. *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Citado na página 16.
- ANDÒ, B.; BAGLIO, S.; PISTORIO, A. A Low Cost Multi-sensor Strategy for Early Warning in Structural Monitoring Exploiting a Wavelet Multiresolution Paradigm. *Procedia Engineering*, v. 87, p. 1282 – 1285, 2014. ISSN 1877-7058. {EUROSENSORS} 2014, the 28th European Conference on Solid-State Transducers. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814028033>>. Citado na página 18.
- BAESSLER, M. et al. Impact of environmental based effects on shm strategies. In: *SEMC 2019-7th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. Citado na página 19.
- BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.-P.; GÜEMES, A. *Structural health monitoring*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. v. 90. Citado na página 16.
- BESKHYROUN, S.; MA, Q. Low-cost accelerometers for experimental modal analysis. In: *Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 18.
- BRACEWELL, R. N.; BRACEWELL, R. N. *The Fourier transform and its applications*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1986. v. 31999. Citado na página 28.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of computation*, JSTOR, v. 19, n. 90, p. 297–301, 1965. Citado na página 28.
- DERAEMAEKER, A.; PREUMONT, A.; KULLAA, J. Modeling and removal of environmental effects for vibration based shm using spatial filtering and factor analysis. *Proceedings of IMAC XXIV*, 2006. Citado na página 19.
- DOEBLING, S.; FARRAR, C. Using statistical analysis to enhance modal-based damage identification. In: *Proc. DAMAS*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 97, p. 199–210. Citado na página 19.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. *Structural health monitoring: a machine learning perspective*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17 e 29.
- GIURGIUTIU, V. Chapter 1 - introduction. In: GIURGIUTIU, V. (Ed.). *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors (Second Edition)*. Second edition. Oxford: Academic Press, 2014. p. 1–19. ISBN 978-0-12-418691-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124186910000010>>. Citado na página 15.
- HE, J.; FU, Z.-F. 1 - overview of modal analysis. In: HE, J.; FU, Z.-F. (Ed.). *Modal Analysis*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 1–11. ISBN 978-0-7506-5079-3. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750650793500012>>. Citado na página 28.

- HOLFORD, K. M. Acoustic emission in structural health monitoring. In: TRANS TECH PUBL. *Key Engineering Materials*. [S.l.], 2009. v. 413, p. 15–28. Citado na página 18.
- LI, H. et al. Structural health monitoring system for the shandong binzhou yellow river highway bridge. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley Online Library, v. 21, n. 4, p. 306–317, 2006. Citado na página 16.
- LU, K.-C. et al. Real-time structural damage detection using wireless sensing and monitoring system. *Smart Structures and Systems*, Techno-Press, v. 4, n. 6, p. 759–777, 2008. Citado na página 19.
- MAHALIK, N. P.; IYUKE, S.; AHN, B. H. Principles of MEMS and MOEMS. *Micromanufacturing and Nanotechnology*, p. 19–44, 01 2006. Citado na página 17.
- NIEZRECKI, C.; BAQERSAD, J.; SABATO, A. Digital image correlation techniques for non-destructive evaluation and structural health monitoring. *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation*, p. 46, 2018. Citado na página 18.
- OZER, E.; FENG, M. Q. Synthesizing spatiotemporally sparse smartphone sensor data for bridge modal identification. *Smart Materials and Structures*, v. 25, n. 8, p. 085007, 2016. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0964-1726/25/i=8/a=085007>>. Citado na página 18.
- PALOMINO, L. V. et al. Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural. Universidade Federal de Uberlândia, 2008. Citado na página 18.
- QUQA, S.; LANDI, L.; DIOTALLEVI, P. Real time damage detection through single low-cost smart sensor. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, Greece*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 24–26. Citado na página 19.
- RAO, S. S. *Mechanical Vibrations*. Pearson Education, Incorporated, 2017. ISBN 9780134361307. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=t6gHswEACAAJ>>. Citado na página 15.
- RATCLIFFE, C. et al. Investigation into the use of low cost mems accelerometers for vibration based damage detection. *Composite Structures*, Elsevier, v. 82, n. 1, p. 61–70, 2008. Citado na página 18.
- RIBEIRO, R. R.; LAMEIRAS, R. d. M. Evaluation of low-cost mems accelerometers for shm: frequency and damping identification of civil structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*, SciELO Brasil, v. 16, n. 7, 2019. Citado na página 18.
- RYTTER, A. Vibrational based inspection of civil engineering structures. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993. Citado na página 15.
- SABATO, A.; NIEZRECKI, C.; FORTINO, G. Wireless mems-based accelerometer sensor boards for structural vibration monitoring: a review. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 226–235, 2016. Citado na página 18.
- SCHWARZ, B. J.; RICHARDSON, M. H. Experimental modal analysis. *CSI Reliability week*, Orlando FL, v. 35, n. 1, p. 1–12, 1999. Citado na página 28.

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 o Computational Methods in Engineering*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

SRIVASTAVA, D.; KESARWANI, A.; DUBEY, S. Measurement of temperature and humidity by using arduino tool and dht11. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 5, n. 12, p. 876–878, 2018. Citado na página 25.

TEVES, A. d. C. *Otimização de acelerômetros MEMS eletroestáticos de alto desempenho*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 24.

UBERTINI, F. et al. Environmental effects on natural frequencies of the san pietro bell tower in perugia, italy, and their removal for structural performance assessment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 82, p. 307–322, 2017. Citado na página 20.

WOOD, M. G. *Damage analysis of bridge structures using vibrational techniques*. Tese (Doutorado) — Aston University, 1992. Citado na página 19.

XIA, Y. et al. Long term vibration monitoring of an rc slab: Temperature and humidity effect. *Engineering Structures*, v. 28, n. 3, p. 441–452, 2006. ISSN 0141-0296. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029605003172>>. Citado na página 19.

ZOU, Y.; TONG, L.; STEVEN, G. P. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures—a review. *Journal of Sound and vibration*, Elsevier, v. 230, n. 2, p. 357–378, 2000. Citado na página 18.

APÊNDICE A – ROTINA COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO

```

#include <WiFi.h>
#include <ThingSpeak.h>
#include <fft.h>                                // Biblioteca de FFT

// DHT sensor library - Version: Latest
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11

//GPIO do NodeMCU que o pino de comunicação do sensor está ligado.
#define DHTPIN 23
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

/* defines - wi-fi */
const char ssid[] = "Claudia 2"; //nome da rede que se deseja conectar
const char password[] = "a1a2a3a4a5"; //senha da rede que se deseja conectar
WiFiClient client;

/* constantes e variáveis globais thingspeak */
long prevMillisThingSpeak = 0;
int intervalThingSpeak = 15000;
//Intervalo mínimo para escrever no ThingSpeak write é de 15 segundos
const long CHANNEL = 1460149;
const char *WRITE_API = "K1DX2950YY5W22JZ"; //chave de escrita do seu canal

// Dados de entrada para processamento da aceleração
#define Fs 128.0 // Frequência de amostragem [Hz]
#define NFFT 1024 // Tamanho do sinal a ser adquirido (em quantidade de pontos)
float T = pow(10,6)/Fs; // Período de aquisição em micro-segundos
int tempvalue; // Valor temporário para o analogread
float value[NFFT]; // Vetor com valores medidos no sensor
float fftmag[NFFT]; // Vetor com magnitude da FFT
int i; // Variável auxiliar para percorrer vetor
int temp; // Variável auxiliar para tempo
int peak_pos_1; // Variável com posição do pico 1
int peak_pos_2; // Variável com posição do pico 2
unsigned long last_us = 0; // Variável para tempo inicial long
float fft_input[NFFT]; // Vetores para FFT
float fft_output[NFFT]; // Vetores para FFT
const int xpin = A3; // x-axis of the accelerometer

// Função para encontrar o máximo em array "arr" com tamanho "arrsize"

```



```
float findmax(float arr[],int arrsize)
{
    float maxValue = arr[0];
    for (int k = 1;k<arrsize;++k)
        {
            if(arr[k]>maxValue)
                {
                    maxValue = arr[k];
                }
        }
    return maxValue;
}

// Função para encontrar o mínimo em array "arr" com tamanho "arrsize"
float findmin(float arr[],int arrsize)
{
    float minValue = arr[0];
    for (int k = 1;k<arrsize;++k)
        {
            if(arr[k]<minValue)
                {
                    minValue = arr[k];
                }
        }
    return minValue;
}

// Função para encontrar posição do máximo em "arr" entre os índices "arr_ini" e "arr_end"
int findmax_bound(float arr[],int arr_ini,int arr_end){
    int maxIndex = arr_ini;
    float maxValue = arr[maxIndex];
    for (int k = arr_ini+1;k<arr_end;++k){
        if(arr[k]>maxValue){
            maxValue = arr[k];
            maxIndex = k;
        }
    }
    return maxIndex;
}

// Função para encontrar RMS de um array
float rms_calc(float arr[],int arrsize){
    float rmsvalue = 0.0;
    // Calcula o somatório dos pontos ao quadrado
    for (int k = 0;k<arrsize;++k){
        rmsvalue = rmsvalue + pow(arr[k],2);
    }
}
```

```
// Calcula RMS
rmsvalue = sqrt(rmsvalue/arrsize);
return rmsvalue;
}

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  Serial.println();
  Serial.println("Envia os dados do sensor para o ThingSpeak usando o ESP32");
  Serial.println();

  WiFi.mode(WIFI_STA); //Modo Station
  ThingSpeak.begin(client); // Inicializa o ThingSpeak

  /* Inicializa sensor de temperatura e umidade relativa do ar */
  dht.begin();

  // conexão acelerômetro
  pinMode(xpin, INPUT);
}

//loop principal
void loop()
{
  // Conecta ou reconecta o WiFi
  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.print("Atenção para conectar o SSID: ");
    Serial.println(ssid);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
      WiFi.begin(ssid, password);
      Serial.print(".");
      delay(5000);
    }
    Serial.println("\nConectado");
  }

  //variáveis
  char fields_a_serem_enviados[100] = {};
  float maximo;
  float minimo;
  float rms;
  float soma=0, media_=0, variancia_=0, desvio=0, somadosquadrados=0;
  float temperatura_lida;
  float umidade_lida;
  float W1, W2;

  // Contagem regressiva
```

```
Serial.println("CONTAGEM REGRESSIVA PARA MEDICAO");
Serial.println("5");
delay(1000);
Serial.println("4");
delay(1000);
Serial.println("3");
delay(1000);
Serial.println("2");
delay(1000);
Serial.println("1");
delay(1000);
Serial.println("FAZENDO MEDICAO (5 segundos)");

// Atualiza last_us
last_us = micros();

// Laco principal para preencher vetor de medidas
for (i=0;i<NFFT;++i)
{
    temp = micros()-last_us; // Tempo decorrido em relacao ao inicio da aquisicao
    // Se tempo e maior ou igual a periodo de amostragem captura dado do sensor
    if (temp >= T)
    {
        last_us += T;
        tempvalue=analogRead(xpin);
        // Leitura da porta analógica (resulta em valor int)
        value[i] = tempvalue*-0.002518 + 4.668550;
        // Conversão para [g] (valores calibrados com sensor)
    }
    // Se tempo for menor continua esperando ate dar o periodo de amostragem
    else if (temp < T)
    {
        i = i-1;
    }
}

// for (i=0;i<NFFT;++i)
// {
//     Serial.println(value[i]);
// }

//Max,Min e RMS
maximo = findmax(value,NFFT);
minimo = findmin(value,NFFT);
rms = rms_calc(value,NFFT);

//Desvio padrão
```

```
for (short i=0; i<NFFT; ++i)
{
    soma += value[i];
}
media_ = soma/NFFT;
for (short i=0; i<NFFT; ++i)
{
    somadosquadrados += sq (value[i]-media_);
}
variancia_ = somadosquadrados / (NFFT-1);
desvio = sqrt (variancia_);

// Inicialização do algoritmo de FFT
fft_config_t *real_fft_plan = fft_init(NFFT, FFT_REAL, FFT_FORWARD, fft_input, fft_output);

//Extração de W1 e W2
// Laco para preencher sinal para calculo da FFT
for (int k = 0 ; k < NFFT ; ++k)
{
    real_fft_plan->input[k] = (float) value[k];
}

// Executa FFT
fft_execute(real_fft_plan);

// Calcula vetor com magnitude da FFT e exibe na tela
for (int k = 0 ; k < real_fft_plan->size / 2 ; ++k)
{
    fftmag[k] = sqrt(pow(real_fft_plan->output[2*k],2) +
    pow(real_fft_plan->output[2*k+1],2))/(NFFT/2.0);
    Serial.println(fftmag[k],4);
}

// Posição do pico da magnitude
peak_pos_1 = findmax_bound(fftmag,10,100);
// Máxima freq. entre 10 (10*(Fs)/NFFT=1.25 Hz) e 100 (100*(Fs)/NFFT=12.5 Hz)
W1 = peak_pos_1*(Fs)/(NFFT);           // Frequência do pico

// Posição do pico da magnitude
peak_pos_2 = findmax_bound(fftmag,101,200);
// Máxima freq. entre 101 (101*(Fs)/NFFT=12.625 Hz) e 200 (200*(Fs)/NFFT=25.0 Hz)
W2 = peak_pos_2*(Fs)/(NFFT);           // Frequência do pico

// Prints
Serial.print("Aceleração máxima:");
Serial.println(maximo,4);
Serial.print("Aceleração mínima:");
```

```
Serial.println(minimo,4);
Serial.print("Desvio padrão:");
Serial.println(desvio,4);
Serial.print("RMS do sinal:");
Serial.println(rms,4);
Serial.print("Maxima frequencia - faixa 1 [Hz]: ");
Serial.println(W1,4);
// Freq. natural não danificada = 7Hz
Serial.print("Maxima frequencia - faixa 2 [Hz]: ");
// Freq. natural não danificada = 18,56Hz
Serial.println(W2,4);

//Temperatura e umidade
temperatura_lida = dht.readTemperature();
umidade_lida = dht.readHumidity();
Serial.print("Temperatura Medida: ");
Serial.println(temperatura_lida,4);
Serial.print("Umidade Medida:");
Serial.println(umidade_lida,4);

// Coloca um delay e destrói a FFT
delay(15000);
fft_destroy(real_fft_plan);

if (millis() - prevMillisThingSpeak > intervalThingSpeak) {
  // Configura os campos com os valores
  ThingSpeak.setField(1,temperatura_lida);
  ThingSpeak.setField(2,desvio);
  ThingSpeak.setField(3,umidade_lida);
  ThingSpeak.setField(4,maximo);
  ThingSpeak.setField(5,minimo);
  ThingSpeak.setField(6,rms);
  ThingSpeak.setField(7,W1);
  ThingSpeak.setField(8,W2);

  // Escreve no canal do ThingSpeak
  int x = ThingSpeak.writeFields(CHANNEL, WRITE_API);
  if (x == 200) {
    Serial.println("Update realizado com sucesso");
  }
  else {
    Serial.println("Problema no canal - erro HTTP " + String(x));
  }
  prevMillisThingSpeak = millis();
}
}
```