

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES UTILIZANDO ARDUINO PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO EM ESTRUTURAS CIVIS

Simone Silva Frutuoso de Souza

RESUMO

A durabilidade de estruturas civis é afetada por fatores como vibrações, desgaste de materiais e falta de manutenção, podendo gerar prejuízos econômicos e comprometer o conforto dos ocupantes. Assim, torna-se essencial avaliar a integridade estrutural e estabelecer critérios de segurança para uso. Neste estudo, foram realizados ensaios em uma viga de um edifício de dois pavimentos para identificar os níveis de vibração. Utilizou-se um sensor acelerômetro conectado a um microcontrolador Arduino UNO, com processamento dos dados por software em Python. O programa coletou informações, calculou frequências e gerou gráficos para análise. Os resultados obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pela norma NBR 6118:2014, garantindo que a estrutura atendesse aos requisitos de segurança e conforto humano. O trabalho demonstra a importância do monitoramento contínuo para prevenir problemas estruturais e otimizar a manutenção preventiva.

Palavras-chave: Vibração, Estrutura, Arduino, Sensor, Conforto Humano.

VIBRATION ANALYSIS USING ARDUINO TO EVALUATE HUMAN COMFORT IN CIVIL STRUCTURES

ABSTRACT

The durability of civil structures is affected by factors such as vibrations, material wear, and lack of maintenance, which can lead to economic losses and compromise occupant comfort. Therefore, it is essential to assess structural integrity and establish safety criteria for use. In this study, tests were carried out on a beam of a two-story building to identify vibration levels. An accelerometer sensor connected to an Arduino UNO microcontroller was used, with data processed by Python software. The program collected information, calculated frequencies, and generated graphs for analysis. The results obtained were compared with the limits established by the NBR 6118:2014 standard, ensuring that the structure met safety and human comfort requirements. This work demonstrates the importance of continuous monitoring to prevent structural problems and optimize preventive maintenance.

Keywords: Vibration, Structure, Arduino, Sensor, Human Comfort.

Instituição afiliada – Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), campus Tangará da Serra

Dados da publicação: Artigo publicado em Agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.36557/pbpc.v4i2.383>

Autor correspondente: *Simone Silva Frutuoso de Souza*

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A área da construção civil engloba toda atividade de produção de obras, como casas, edifícios, pontes, viadutos etc. Pensando no conforto humano, os engenheiros encontram-se em constante movimento, elaborando ensaios, incrementando e melhorando as questões tecnológicas, com intuito de inovar, sem que afete o meio ambiente, trazendo tecnologias sustentáveis, e que sejam viáveis economicamente. Assim surge o acompanhamento das estruturas, que é um monitoramento para comprovar se os resultados estão sendo previstos como no projeto, e se a estrutura não tem o perigo para os usuários e que possa ser utilizado de maneira eficaz amparando os deveres do cotidiano da sociedade.

A análise estrutural deve ser estudada e observada pois existem fenômenos imprevisíveis, como as ações de vibração indesejadas, tendo como resposta a própria estrutura. As vibrações, que são movimentos mecânicos, periódicos ou aleatórios da estrutura, se caracteriza por um movimento repetitivo a partir do repouso. Podem ser produzidas pelo movimento de vento, tráfego de veículos, equipamentos, máquinas ou pessoas. Essas vibrações indesejáveis podem causar perigo para o usuário podendo haver até desmoronamento da estrutura. (SERPA,2015).

Para analisar a estrutura e sua vibração são utilizados equipamentos profissionais que são extremamente caros. Este trabalho tem como proposta o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo que obtém resultados semelhantes a um instrumento profissional, onde será desenvolvido um sistema de análise de vibração para avaliação do conforto humano em estrutura de concreto comparando-se com a ABNT NBR 6118:2014 em um prédio, pois tais estruturas podem ter níveis de vibrações perceptíveis aos ocupantes.

A tecnologia a ser aplicada será o Arduino, que é uma plataforma de criação de protótipos em Open-Source (código aberto), de maneira simples e com baixo custo. Utiliza-se também o sensor MPU-6050 que conta com um acelerômetro e um giroscópio em um único chip, que mede a aceleração e rotação nos três eixos (x, y, z), com seis graus de liberdade, boa precisão, baixo custo e boa aplicabilidade.

É de suma importância desenvolver este tipo de protótipo para medição e análise de vibrações e aplicar em obras, bem como estruturas concluídas, para que não haja perigo para os ocupantes, avaliando-se o comportamento da vibração nas

estruturas e comparar se os resultados encontrados se adequam aos parâmetros estipulados pela norma ABNT NBR 6118:2014. Com esse protótipo de baixo custo, pode-se avaliar o conforto humano em qualquer edificação estrutural, de modo a identificar o comportamento vibratório, bem como os riscos e parâmetros.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Nesta seção apresentam-se os conceitos básicos necessários para a construção do conhecimento e desenvolvimento deste artigo.

2.1 Análise Estrutural

O momento primordial que exige maior cautela pelo engenheiro ou arquiteto durante o desenvolvimento do projeto de uma obra é a análise estrutural do projeto oferecido. Segundo Martha (2010), a análise estrutural “é a fase do projeto estrutural em que é feita a idealização do comportamento da estrutura.” De tal maneira o comportamento é caracterizado por vários preceitos do modo que “campos de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura, bem como a determinação dos deslocamentos e as correspondentes deformações da estrutura que está sendo projetada.”

O autor ainda destaca que “essa análise deve ser realizada para os possíveis estágios de carregamentos e solicitações que devem ser previamente determinados”. A característica de análise vai precisar das ações ativas na estrutura estudada e das condições propostas, assim sendo neste trabalho será explorado as vibrações (MARTHA, 2010).

Segundo Costa (2003):

“Existem microcomputadores e programas de análise estrutural que permitem, na maioria das vezes, a concepção de modelos estruturais mais sofisticados. Isto permite ao projetista de estruturas liberar-se do ônus do trabalho numérico e dedicar mais seu tempo à concepção estrutural, com consequente aperfeiçoamento do projeto.” (COSTA, 2003).

Análise estrutural tem como função definir os impactos das ações solicitantes em uma estrutura, isto é, calcular os esforços, deslocamentos e tensões por toda extensão da estrutura. A estrutura tem finalidade a passagem das cargas verticais que alcançam o solo. Para edifícios múltiplos as forças horizontais precisam de uma maior atenção na análise estrutural. (VASCONCELLOS FILHO, 1981).

A propósito, a norma NBR-6118/80 afirma que:

“Será exigida a consideração da ação do vento nas estruturas em que esta ação possa produzir efeitos estáticos ou dinâmicos importantes e obrigatoriamente no caso de estruturas com nós deslocáveis, nas quais a altura seja maior que 4 vezes a largura menor; ou em que, numa dada direção, o número de filas de pilares seja inferior a 4.”

2.2 Vibração Mecânica

Bessa (2019) (*apud* Mendes, 2012 e Diógenes, 2010), consideram que “todas as ações possuem características dinâmicas, já que apresentam variações de grandeza, direção e sentido com o tempo. Porém, algumas dessas ações podem ter seu efeito dinâmico desprezado e ser consideradas estáticas”.

O estudo que analisa os movimentos ou deslocamentos de corpos, ocorridos por forças aplicadas, como também estuda as forças que provocam o movimento da estrutura é conhecido como análise dinâmica (FERRO, 2014; OGATA, 2010; RAO, 2008).

Conforme Lopes (2017):

Todos os sistemas vibratórios possuem infinitos graus de liberdade, o que faz com o que as equações de equilíbrio dinâmico do sistema não sejam equações diferenciais ordinárias, e sim equações diferenciais parciais no tempo e na posição (x, y, z).

Portanto, existe uma frequência natural para cada modo de vibração, sendo analisado pelo projetista qual será a frequência, e deve verificar se na estrutura pode ocorrer frequências diferente da natural. Caso ocorra o fenômeno causado chama-se ressonância, podendo gerar comprometimento da estrutura (RAO, 2008).

A pesquisa de análises de vibração, permitiram durante o tempo criações de métodos de cálculos através dos softwares que podem ser resolvidos em um curto tempo. De acordo com Walber (2009), pode-se afirmar que:

Permitiu o desenvolvimento de métodos numéricos de análise de sistemas de vários graus de liberdade, possibilitando a criação de modelos matemáticos confiáveis para representar o comportamento de sistemas de grande porte. Instrumentos de alta tecnologia permitem o desenvolvimento de métodos experimentais que, associados aos métodos computacionais, proporcionaram extraordinários avanços de problemas vibratórios.

As vibrações estão presentes em todas as nossas atividades do dia-a-dia, seja no corpo humano ou seja em uma estrutura. De acordo com Soeiro et al. (2011), no

corpo humano as vibrações estão prontamente ligadas a respiração dos pulmões, a ação vibratória do coração, ou seja, os batimentos cardíacos, as cordas vocais nas quais sai a fala, e oscilações de movimento de braços e pernas. Já na engenharia civil é de grande valia nos dias de hoje como em projetos de máquinas, estruturas, turbinas, motores entre outros tópicos relacionados a vibrações levados em consideração.

Soeiro et al. (2011), ainda destaca sobre as vibrações, “na avaliação ocupacional da vibração, vários fatores influenciam na caracterização do risco, entre os quais se destacam: amplitude da vibração, sua frequência, sua direção e o tempo de exposição das pessoas”.

Em uma estrutura o comportamento de vibração está conectado a diferentes possibilidades, no entanto, o que se mais questiona são as frequências de mudanças e forças que atuam nas estruturas, sendo estas capazes de causar a ressonância e o desconforto humano (BEREZOSKI, et al., 2017; RAO, 2008).

Os problemas de vibrações em estruturas podem ser agrupados em dois domínios distintos, nomeadamente, os problemas de vibrações que podem afetar a integridade estrutural e os problemas relacionados com o nível de conforto proporcionado aos seus utilizadores (MOUTINHO, 2007; RAO, 2008). Nesta pesquisa, busca-se analisar o segundo problema.

2.3 Critérios de Conforto Humano

O efeito da ação dinâmica das rajadas de vento sobre as fachadas de edifícios altos pode causar amplitudes de vibração perceptíveis aos ocupantes, especialmente na ocorrência de fenômenos de ressonância associados ao baixo conteúdo espectral da ação (BACHMANN, 1995).

As frequências naturais, podem afetar o conforto humano, ocasionando desconfortos, problemas na saúde, enjoos, redução da capacidade de concentração e acarretando problemas na eficiência no trabalho/estudo, segundo a norma ISO 2631.

Segundo Pereira (2005):

Compreender como a vibração é transmitida ao corpo humano é um pré-requisito para entender completamente como esta influência no conforto humano, no desempenho das atividades ocupacionais e na saúde. A transmissibilidade pode ser definida como a razão entre a magnitude de um

ponto qualquer com a do ponto de entrada para determinado componente de frequência.

Segundo Pereira (2005), o ser humano é como uma estrutura biomecânica com funcionalidades complexas e possui uma sensibilidade à vibração pelos fatores de postura, frequência, amplitude, duração e direção da vibração, e postura.

A norma brasileira NBR 6118:2014 acentua as exigências necessárias para a realização de projetos de estrutura de concreto protendido no Brasil. Em concordância com a NBR 6118, o comportamento das estruturas sujeitas a vibrações, recomenda-se deslocar a maior quantidade possível a frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit}), que vai de acordo com a edificação. Consoante com a equação (1):

$$f > 1,2 f_{crit} \quad (1)$$

A norma propõe que as frequências naturais devem superar, do valor da frequência crítica, no mínimo 20%. A frequência crítica vai variar de acordo com o tipo da estrutura, conforme a tabela 1, retirada da norma NBR 6118:2014.

Em casos especiais, na qual as diretrizes não puderem ser atendidas, é feita uma análise dinâmica mais precisa, conforme a norma internacional, enquanto não existir na norma brasileira.

Tabela 1 - Frequência Crítica.

Caso	f_{crit} (Hz)
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

2.4 Arduino

De acordo com Freitas et al. (2017) (*apud* McRoberts, 2011):

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica, criada em 2005 na Itália, tem o objetivo de facilitar a interação do mundo físico com o mundo virtual, a partir de estímulos digitais e analógicos em suas portas.

O Arduino é um microcontrolador de código aberto, que é muito popular entre o público em geral, por ser fácil de usar, custo baixo, programação simples, passando a ser um apetrecho para testar rapidamente protótipos eletrônicos. A junção do Arduino é realizada pelos aparelhos digitais e as portas analógicas e digitais que recebem informações de sensores e atuadores (VARANIS et al., 2015).

Os materiais utilizados para a análise de vibração são de extrema importância para a construção civil. González (2014), afirma que:

O desenvolvimento dos instrumentos de medição, equipamento de monitoração e softwares especializados, utilizados atualmente, permite que sejam reconhecidos, em forma incipiente, diversos tipos de falhas como, por exemplo, desbalanceamento, desalinhamento, empenamento de eixos, excentricidade, desgaste em engrenagens e mancais, má fixação da máquina ou de componentes internos, orçamentos, erosão, ressonância, folgas, desgastes em rolamentos e outros componentes rotativos, fenômenos aerodinâmicos e/ou hidráulicos e problemas elétricos.

Os métodos utilizados nas análises de vibração, estão cada vez mais avançados, desde as técnicas mais simples como cálculo dos valores médios das amplitudes, até os mais difíceis, com cálculos de convergência e retrospecto de frequência (HAMMOND e SHIN, 2008).

Arduino é um conjunto que pode interagir com seu local por *hardware* e *software* anexados a um dispositivo com uma intenção definida. Refere-se a um projeto de código livre que pode ser “clonado” em *software* que é aplicado em linguagem de programação em C/C ++, ou em *hardware* (MCROBERTS, 2013).

A vantagem de utilizar o arduino é a facilidade de junção da placa com outros dispositivos eletrônicos, fazendo-se a integração de diferentes materiais para a elaboração de projetos eletrônicos. Outra vantagem é a facilidade de ter vários sensores fazendo com que seja de grande utilidade em processos de automação (SAMPAIO, 2022). A Figura 1 ilustra a placa do Arduino.



Figura 1 - Principais Pontos do Arduino.

2.5 Sensor Acelerômetro MPU-6050

O sensor MPU-6050 é definido por Firman et al. (2016), conforme a seguir:

O MPU 6050 é um chip IC inverso no qual existem sensores integrados de acelerômetro e giroscópio. O acelerômetro é usado para medir a aceleração, a aceleração do movimento e também a aceleração gravitacional. Os acelerômetros são frequentemente usados para calcular ângulos de inclinação e só podem fazê-lo significativamente quando estacionários e sem movimento.

Este ângulo de inclinação, é programado com um ou mais giroscópios e a ligação de dados é utilizada para calcular o ângulo. O giroscópio é um aparelho para manter ou medir a orientação, conforme o momento angular (FIRMAN, et al., 2016).

Rafic, et al. (2020) destaca que o Arduino e o MPU 6050 utilizados juntamente, apresentam eficiência e precisão e podem ser utilizados para coleta de dados.

Firman, et. al., (2016) destaca que “O sensor giroscópio é um dispositivo para medir ou manter a orientação, com os princípios da determinação do momento angular. O mecanismo é uma roda giratória com um disco interno que permanece estável”. A Figura 2 ilustra o acelerômetro MPU6050.



Figura 2 - A forma física do Módulo MPU6050.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estratégias Metodológicas Utilizadas

Para desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os métodos de pesquisa bibliográfica, pesquisa & desenvolvimento, e experimentação.

O método bibliográfico foi utilizado para realizar o levantamento dos conceitos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa. Assim utilizou-se artigos, revistas, livros etc. O método de pesquisa & desenvolvimento foi utilizado para desenvolvimento de um protótipo para análise de vibração utilizando o Arduino. E o método de experimentação foi utilizado para conduzir ensaios de análise vibratória.

Assim, nesta pesquisa, foram realizados o desenvolvimento de um protótipo com o Arduino e o sensor MPU-6050 para analisar vibrações, que foi testado a partir de ensaios de vibração, e os dados coletados foram processados através do Python.

3.2 Desenvolvimento do Protótipo

Para o desenvolvimento do protótipo inicialmente foram adquiridos os materiais a serem utilizados para a montagem e ligação do circuito. Foi escolhido o programa Python para coletar os sinais de vibrações na estrutura, processar e gerar os gráficos e salvamento dos dados.

Foi montado o circuito com o Arduino UNO Rev3 e o sensor acelerômetro MPU-6050, na qual o Arduino é uma plataforma de código aberto que é utilizada para criar projetos interativos onde possui um controlador na placa e um ambiente de desenvolvimento integrado que permite programar o microcontrolador possibilitando diversas tarefas. E o MPU-6050 é um sensor que possibilita a medição da orientação e aceleração de movimento.

Primeiramente foi realizado um teste preliminar de funcionamento do protótipo, usando o Arduino e sensor ligados a partir de jumpers, conforme ilustrado na Figura 3. Posteriormente, foi realizada a soldagem do sensor em um cabo de rede, e o circuito colado com cola quente para que não houvesse problemas com a saída dos cabos do Arduino, conforme ilustrado na Figura 4. Foi utilizado um cabo de rede com 4 metros de comprimento, visando facilitar a utilização nos ensaios experimentais.

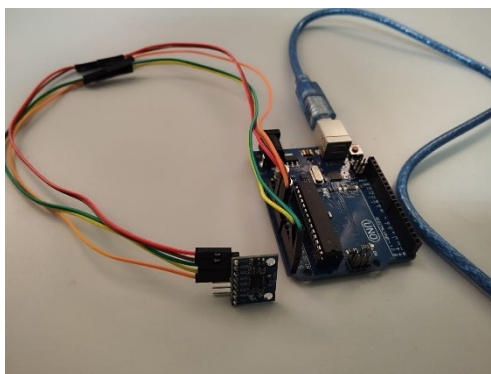


Figura 3 – Protótipo de teste inicial.



Figura 4 - Com o cabo e a Solda.

Para realizar a soldagem foi utilizado o esquema de ligação apresentado na Figura 5. Este esquema ilustrativo demonstra como foi realizada a montagem no Arduino, os locais onde foram colocados os fios conectando o sensor MPU-6050 com o Arduino.

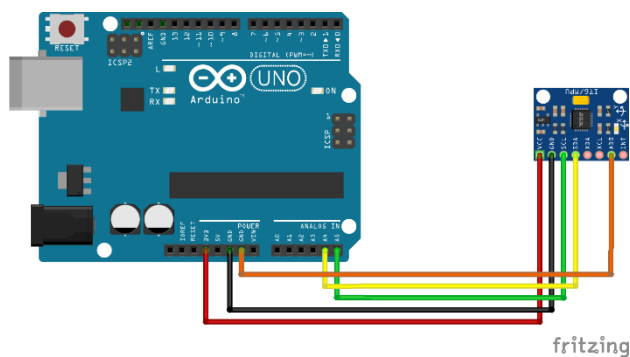


Figura 5 - Esquema Ilustrativo Arduino.

Na Figura 6, ilustra-se o sensor já conectado ao Arduino, com os devidos cabos conectados e soldados no sensor. A cola quente serviu por segurança, para não houvesse os deslocamentos dos cabos.



Figura 6 - Sensor.

Após realizar a montagem do protótipo o mesmo foi programado utilizando a plataforma de programação IDE do Arduino.

O Arduino foi programado para capturar a aceleração nos 3 eixos, e enviar para o computador via comunicação Serial. O sensor MPU-6050 mede a força gravitacional em uma faixa entre -2g e +2g, em que no Arduino é obtido valores entre -32767 e +32767. Desta forma para obter os valores de aceleração é necessário realizar uma conversão dos dados, fazendo-se uma normalização da força G e multiplicando pela aceleração da gravidade que é uma constante de valor 9,8066 m/s². E como são usados 3 graus de liberdade, isto é, 3 coordenadas (x, y e z) é preciso realizar a norma vetorial.

A conversão dos dados foi realizada conforme equação a seguir (MPU, 2024):

$$Ac = \sqrt{\left(\frac{Acx}{16385,5} \times 9,8066\right)^2 + \left(\frac{Acy}{16385,5} \times 9,8066\right)^2 + \left(\frac{Acz}{16385,5} \times 9,8066\right)^2} \quad (2)$$

Onde: Ac é aceleração obtida, Acx é força gravitacional em x, Acy é força gravitacional em y e Acz é força gravitacional em z.

A metodologia utilizada para obter os valores de aceleração foi disponibilizada pelo produtor do sensor, através da documentação oficial, disponibilizada junto com a biblioteca open-source que pode ser instalada na plataforma do Arduino (MPU, 2024).

3.3 Processamento dos Sinais e Cálculo de Frequências

Após montagem do protótipo e programação do Arduino foi desenvolvido um software na linguagem Python para fazer a coleta dos dados, processamento dos sinais e cálculo das frequências.

Neste sentido, o programa foi feito para coletar os valores de aceleração que o Arduino envia via comunicação Serial para o computador. Assim o Python faz a leitura da porta serial, salvando estes valores em uma variável que posteriormente é salva em um arquivo TXT. Para esta tarefa foi utilizada a biblioteca “serial” que permite ler portas seriais de comunicação entre o Arduino e o Python. Na fase de coleta dos dados o usuário do programa pode definir o número de pontos a serem amostrados, isto é, quantas posições o sinal de aceleração irá ter. Os sinais devem estar na base 2, isto é, estar em uma escala que possa ser processada posteriormente pela FFT. De acordo com o teorema de Nyquist de processamento de sinais, os sinais devem ter comprimento na base 2, para evitar a perda de informações, denominado “aliasing”. A base 2 é quando utiliza-se 2 elevado a qualquer valor. Por exemplo, $2^9 = 512$ pontos de amostragem.

A partir desta coleta dos dados é realizado um processamento dos sinais, aplicando-se a transformada rápida de Fourier (FFT). A transformada rápida de Fourier (FFT) é uma técnica fundamental para análise de sinais que permite decompor um sinal no domínio do tempo em suas componentes no domínio da frequência. Isso é útil em uma variedade de aplicações, incluindo análise modal, onde podemos examinar as características modais de uma estrutura ou sistema vibratório. A FFT gera como resultado uma resposta em frequência, que é uma variável complexa.

Para calcular a FFT, foram utilizados dois pacotes instalados no Python através do gerenciador PIP, denominados “scipy” e “numpy”.

Após realizar o cálculo da FFT, e obter a resposta em frequência, é necessário calcular a magnitude da resposta em frequência. O cálculo da magnitude é um procedimento padrão aplicado na técnica da FFT, para converter os dados representados em números complexos, para dados em números reais, indicando a magnitude da resposta em frequência. A biblioteca utilizada no Python não fazia o cálculo automático da magnitude, mas a documentação indicava aos usuários a fórmula e os procedimentos para realizar o cálculo (SCIPY, 2024).

Para calcular a magnitude de frequência utiliza-se a seguinte equação (SCIPY, 2024):

$$Mag = \sqrt{(Freq_{real} \times Freq_{real}) + (Freq_{img} \times Freq_{img})} \quad (3)$$

Onde: Mag é a magnitude calculada, $Freq_{real}$ é a parte real do número complexo e $Freq_{img}$ é a parte imaginária do número complexo.

Após identificar a resposta em magnitude de frequência, fez-se os cálculos para identificar a frequência natural.

Para calcular a frequência natural comumente utiliza-se o método de elementos finitos, identificando os modos vibratórios da estrutura (RAO, 2008). No entanto para aplicação de tal método é necessário a modelagem dinâmica da estrutura, o que na maioria dos casos não é possível. Assim utiliza-se o método alternativo que calcula a frequência natural a partir da magnitude de frequência. Este método é descrito em (OGATA, 2010) e (RAO, 2008). É um método aproximado com excelente precisão. É usado com eficiência na análise de vibrações e controle em diversos problemas da literatura.

Conforme Rao (2008), para calcular a frequência natural a partir da magnitude, deve-se analisar qual é o ponto de maior amplitude do sinal. Uma vez identificado este ponto, utiliza-se o valor de amplitude e a sua posição em relação ao número total de pontos do sinal.

A equação para o cálculo da frequência natural é apresentada a seguir (RAO, 2008):

$$Fn = \frac{Amp(Mag) \times posição}{N} \quad (4)$$

Onde: Fn é a frequência natural, $Amp(Mag)$ é a amplitude máxima da magnitude de frequência, posição é a localização do ponto no vetor da magnitude e N é o número total de pontos em que o sinal foi amostrado.

Conforme destacado por (OGATA, 2010), a equação 3 calcula a frequência natural para o maior pico de frequência identificado na magnitude de resposta em frequência. É um método aproximado, porém eficiente e muito utilizado na literatura.

Com a frequência natural encontrada faz-se uma análise comparativa do resultado com a norma NBR 6118:2014.

Adicionalmente, no software desenvolvido em Python foram utilizadas outras bibliotecas como “time” e “matplotlib.pyplot” para gerar informações do tempo de coleta dos dados e gráficos.

A biblioteca “time” permite o cálculo do tempo em segundos e foi utilizada para calcular o tempo de duração da coleta dos dados na fase de ensaios experimentais.

Já a biblioteca “matplotlib.pyplot” possibilita a criação de gráficos. Esta biblioteca foi utilizada para plotar os gráficos do sinal de aceleração coletado na estrutura, e do sinal processado após a FFT, isto é, a magnitude de resposta em frequência.

3.4 Metodologia dos Ensaios Realizados

Para o desenvolvimento do protótipo inicialmente foram adquiridos os materiais a serem utilizados para a montagem e ligação do circuito. Foi escolhido o programa Python para coletar os sinais de vibrações na estrutura, processar e gerar os gráficos e salvamento dos dados.

A metodologia dos ensaios para avaliação da vibração da estrutura foi estruturada em 4 passos, conforme Ilustrado na Figura 7.

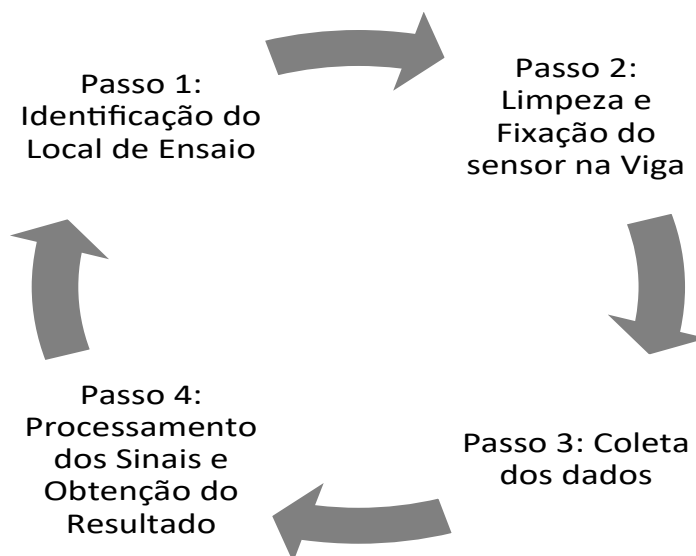


Figura 7 – Metodologia de Ensaios.

No passo 1, foi identificado um local para aplicação dos ensaios. Neste caso foi escolhida uma residência em processo de construção na cidade de Tangará da Serra,

MT, no bairro Parque do Bosque. A residência possui dois pavimentos, onde foi identificada uma viga construída com concreto armado, com apoios em ambas as extremidades, a uma altura aproximada de 4 metros do solo.

No passo 2, o sensor foi fixado a esta viga. Para fixar o sensor na viga, primeiramente foi feita a limpeza da viga. E posteriormente foi colado com fita dupla face e fita isolante para que não houvesse movimento do sensor. A Figura 8, ilustra a viga destacada entre as placas de gesso, e o sensor fixado a mesma.



Figura 8 - Sensor MPU-6050 na viga.

Adicionalmente, o sensor foi conectado ao arduino, que por sua vez, foi conectado ao computador, de modo a proceder a coleta dos dados. A Figura 9 ilustra o arduino conectado ao cabo de rede do sensor e ao computador através da conexão USB.

Posteriormente, no passo 3, foi realizada a coleta dos dados. O experimento foi conduzido de duas formas distintas. Uma para analisar a estrutura em repouso e outra para analisar a estrutura sob o impacto de movimento de pessoas.

Foram realizados vários testes para averiguar se o equipamento estava funcionando corretamente, e após verificação foram realizados os ensaios experimentais.

O primeiro ensaio experimental foi conduzido com o sistema estrutural em condição de livre movimento, sem a introdução de oscilações mecânicas externas, ou seja, sem movimento em cima da estrutura.

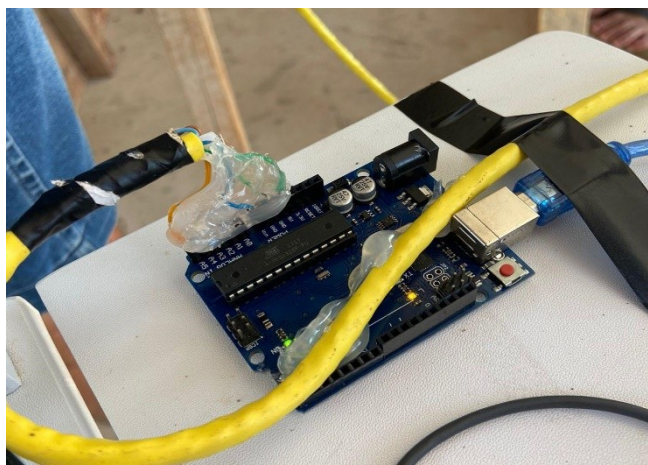


Figura 9 - Arduino conectado ao computador.

Subsequentemente, no segundo ensaio experimental, para simular movimento na estrutura, quatro voluntários foram posicionados sobre a viga no pavimento superior, realizando saltos sobre a laje, emulando atividades com movimentos extremos. As vibrações decorrentes destes saltos foram coletadas através da aceleração. A Figura 10, ilustra os voluntários saltando sobre a viga, de modo a simular uma situação de movimentação extrema.



Figura 10 - Saltos sobre a laje.

A Figura 11, ilustra a autora fazendo a coleta dos dados no computador durante a realização dos ensaios.

Por fim, no passo 4, foi feito o processamento dos sinais e obtenção dos resultados. Para isso, os dados coletados foram processados pelo programa Python e salvos em um arquivo TXT. O processamento dos sinais segue a metodologia descrita na seção 4.2 deste trabalho.



Figura 11 - Coleta dos dados.

Para analisar a capacidade de processamento dos sinais, foram feitos testes com amostragem de 512 pontos. Optou-se por fazer amostragem com essas quantidades devido ao tempo de coleta. Para 512 pontos a coleta foi em torno de 5 minutos. Após o processamento dos dados e finalização dos ensaios, os dados foram salvos em TXT, foram gerados os gráficos de aceleração e magnitude de resposta em frequência e calculada a frequência natural.

4 RESULTADOS

A seguir, apresentam-se os resultados para o ensaio experimental com 512 pontos de amostragem.

4.1 Estrutura em Repouso

A Figura 12, ilustra a aceleração capturada na estrutura em repouso. Esta figura foi gerada pelo Python após coleta dos dados. Conforme observa-se os valores de aceleração são variáveis no tempo, representando a vibração da estrutura.

O tempo para coleta dos dados neste ensaio foi de 4 minutos e 43 segundos.

Na figura 13, apresenta-se a magnitude de resposta em frequência com a estrutura em repouso.

Após a obtenção da magnitude de resposta em frequência, foi obtida a frequência natural. Valores Obtidos através do Python:

- O Pico da magnitude de Resposta em Frequência é = 9,7225 Hz
- A posição do Pico da magnitude é = 257
- N = 512 pontos

Desta forma, aplicando os dados na equação 5, tem-se:

$$Fn = \frac{9,7225 \times 257}{512} = 4,88024 \text{ Hz} \quad (5)$$

A frequência Natural da estrutura em repouso é 4,88024 Hz

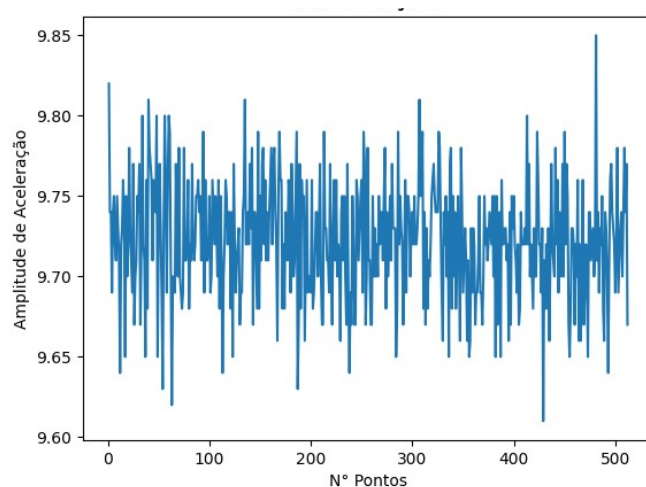


Figura 12 - Aceleração da estrutura em repouso com 512 pontos.

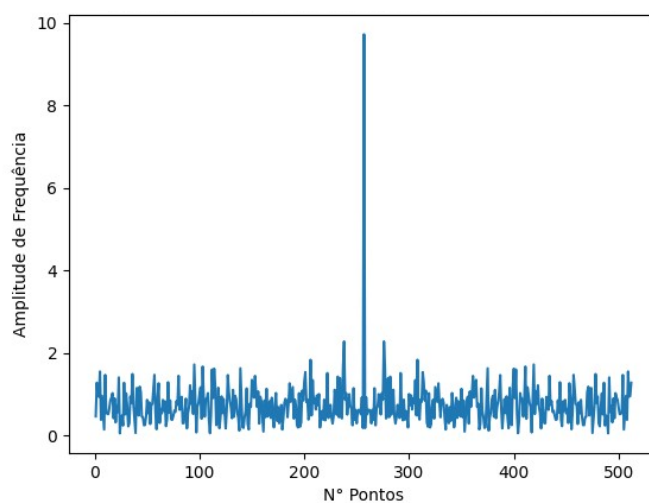


Figura 13 - Magnitude de frequência da estrutura em repouso com 512 pontos.

4.2 Estrutura em Movimento

A Figura 14, ilustra a aceleração capturada na estrutura em movimento. Esta figura foi gerada pelo Python após coleta dos dados. Conforme observa-se os valores de aceleração são variáveis no tempo, representando a vibração da estrutura.

O tempo para coleta dos dados neste ensaio foi de 4 minutos e 49 segundos.

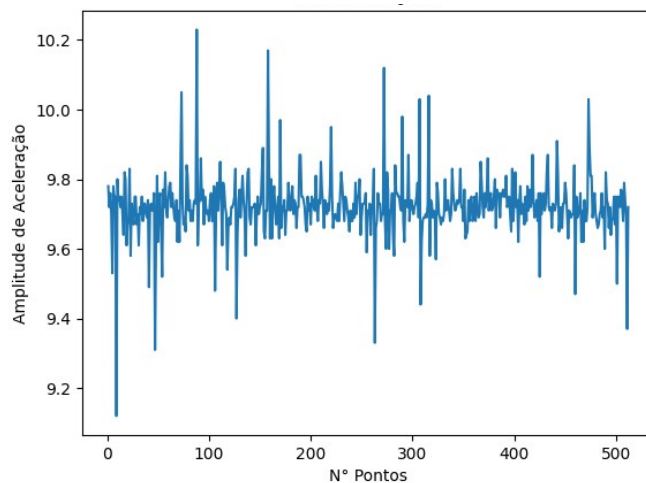


Figura 14 - Aceleração da estrutura em movimento com 512 pontos.

Na figura 15, apresenta-se a magnitude de resposta em frequência com a estrutura em movimento.

Após a obtenção da magnitude de resposta em frequência, foi obtida a frequência natural. Valores Obtidos através do Python:

- O Pico da magnitude de Resposta em Frequência é = 9,7217 Hz
- A posição do Pico da magnitude é = 257
- N = 512 pontos

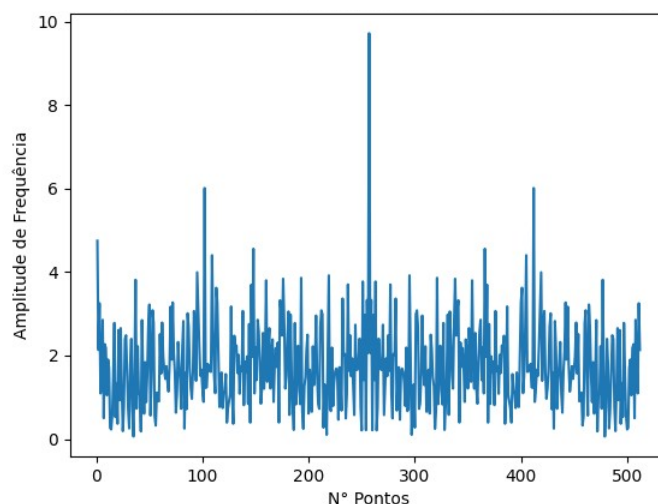


Figura 15 - Magnitude de frequência da estrutura em movimento com 512 pontos.

Desta forma, aplicando os dados na equação 6, tem-se:

$$Fn = \frac{9,7217 \times 257}{512} = 4,87985 \text{ Hz} \quad (6)$$

A frequência Natural da estrutura em movimento é 4,87985 Hz

4.3 Discussão dos Resultados

Após obtenção dos resultados, faz-se uma comparação com a norma ABNT NBR 6118:2014, para avaliação da estrutura.

Segundo a norma ABNT NBR 6118:2014, a frequência natural deve ser maior que a frequência crítica em 20%. Os valores da frequência crítica são disponibilizados na Tabela 1. Foi utilizada a frequência crítica de 4,0 Hz, considerando a especificação de um escritório.

A comparação dos resultados para 512 pontos de amostragem é apresentada na Tabela 2.

Considerando os valores apresentados na tabela 2, observa-se que para o ensaio de 512 pontos de amostragem a estrutura atende os requisitos estabelecidos na norma, tanto para a estrutura em repouso, quanto a estrutura em movimento. As frequências naturais obtidas são bem próximas do exigido pela norma. Assim, avalia-se que a estrutura foi projetada de forma adequada, garantindo o conforto humano através do seu comportamento dinâmico, seguindo os padrões da norma ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 2 – Comparação dos resultados com a norma NBR 6118:2014.

Ensaio	Frequência natural (Fn)	Frequência crítica (fcrit)	Comparação $F_n > 1,2 f_{crit}$	Avaliação
Repouso	4,88024 Hz	4,0 Hz	$4,88024 > 4,8 (1,2 f_{crit})$	Atende a norma
Movimento	4,87985 Hz	4,0 Hz	$4,87985 > 4,8 (1,2 f_{crit})$	Atende a norma

5 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foi apresentado os passos para o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo, utilizando a plataforma Arduino e o sensor MPU-6050, para realizar a análise de vibração em estruturas de concreto. Essa tecnologia acessível e eficaz permitiu avaliar o conforto humano de uma edificação, garantindo a conformidade com a norma ABNT NBR 6118:2014. Com esse protótipo é possível identificar e mitigar os riscos associados às vibrações estruturais, contribuindo para a segurança e o bem-estar dos usuários em ambientes construídos.

Foram realizados testes experimentais e as frequências naturais encontradas variam entre 4,88024 Hz e 4,87985 Hz, variando-se o tipo de ensaio. Demonstrando que a estrutura se comporta dentro dos requisitos da norma. Assim o comportamento dinâmico da estrutura é avaliado como consistente em todos os ensaios realizados.

Por fim, conclui-se que o protótipo atingiu as expectativas de funcionamento, permitindo a análise de vibrações em uma estrutura real, de modo a avaliar o comportamento dinâmico, identificar as suas frequências e tomar decisões. A residência avaliada está dentro dos padrões da norma NBR 6118:2014, estando apta para utilização, garantindo os parâmetros de conforto humano.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BACHMANN, H. et al. Vibration problems in structures: practical guidelines. Springer Science & Business Media, 1995.

- BESSA, B. C. A importância da análise estrutural dinâmica, 2019.
- BEREZOSKI, K. C. et.al. Análise do Conforto Humano Perante as Vibrações de Estádios de Futebol. RETEC-Revista de Tecnologias, v. 10, n. 2, 2017.
- COSTA, C. B. Considerações sobre alguns modelos clássicos para análise estrutural de edifícios de andares múltiplos sujeitos à ação de forças laterais. 2003.
- FERRO, R. M.; FERREIRA, W. G.; CALENZANI, A. F. G. Análise dinâmica de estruturas de aço suportes de máquinas rotativas. 2014.
- FIRMAN, B. Implementasi Sensor IMU MPU6050 Berbasis Serial I2C pada Self-Balancing Robot. Jurnal Teknologi Technoscientia, p. 18-24, 2016.
- FREITAS, V. W. Fre B. et al. Sensor de Vibração Mecânica Utilizando Plataforma Arduino e Material Piezoelétrico. Anais do Encontro de Computação do Oeste Potiguar ECOP/UFERSA (ISSN 2526-7574), n. 1, 2017.
- HAMMOND, J.; SHIN, K. Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers. John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- LOPES, M. A. et al. Otimização estrutural de uma fundação de concreto armado submetida a solicitações dinâmicas provenientes de um conjunto motor-compressor de alta capacidade. 2017.
- MARTHA, L. F. Análise de Estrutura. Conceitos e Métodos Básicos. 2010, Elsevier Editora. p23.
- MENDES, P. Dinâmica de estruturas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012
- MICROBERTS, Michael. Beginning arduino. Apress, 2013.
- MOUTINHO, C. M. R. et al. Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil. 2007.
- MOTA, A. O que é Arduino e como funciona.
- MPU. Documentação oficial da biblioteca MPU6050. Acesso em: 20/03/2024. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/mpu6050/>>

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 4º Edição, Editora Pearson, 800 pg., 2010.

PEREIRA, C. C. G. Curvas de percepção e conforto humano para vibrações verticais. 2005.

RAO, S. Vibrações Mecânicas. 4º Edição, Editora Pearson, 448 pg., 2008.

SAMPAIO, J. J. O. Desenvolvimento e Avaliação de Protótipo de Viscosímetro Rotacional de Baixo Custo Baseado em Impressão 3D e Arduino. 2022.

SCIPY. Documentação oficial da biblioteca Scipy.FFT. Acesso em: 15/04/2024. Disponível em: < <https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/index.html#user-guide> >

SERPA, R. P. P. Caracterização dinâmica de um edifício existente de betão armado através de ensaios de vibração ambiental. 2015. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

SOEIRO, N. S. et al. Vibrações e o Corpo Humano: uma avaliação ocupacional. Revista da Sociedade Brasileira de Acústica, 2011. p.54.

VARANIS, M. et al. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 38, 2016.

VASCONCELLOS FILHO, A. Edifícios de andares múltiplos. Universidade Federal de Minas Gerais-Escola de Engenharia. Edições COTEC, v. 6, p. 148, 1981.

WALBER, M. Avaliação dos Níveis de Vibração Existentes em Passageiros de Ônibus Rodoviários Intermunicipais, Análise e Modificação Projetual (Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.