



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE
CORDENADORIA DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
MARCELO MATOS BRANDÃO ROCHA FILHO

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS
FREQUÊNCIAS NATURAIS DE PISOS DE
CONCRETO SUBMETIDA A CARGAS
DINÂMICAS.

ARACAJU

2022

MARCELO MATOS BRANDÃO ROCHA FILHO

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS
FREQUÊNCIAS NATURAIS DE PISOS DE
CONCRETO SUBMETIDA A CARGAS
DINÂMICAS.

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto
Federal de Sergipe como pré-
requisito para a obtenção do
grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Mst. Marcilio
Fabiano Goivinho da Silva

ARACAJU

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rocha Filho, Marcelo Matos Brandão.

R672e Estudo numérico e experimental das frequências naturais de pisos de
concreto submetidas a cargas dinâmicas. / Marcelo Matos Brandão
Rocha Filho. – Aracaju, 2022.

46 f. : il.

Orientador: Prof. Me. Marcilio Fabiano Govinho da Silva. Monografia
(Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de
Sergipe, 2022.

1. Vibração. 2. Laje. 3. Carga dinâmica. 4. Frequência natural. I. Silva,
Marcilio Fabiano Govinho da. II. Título.

CDU 624.01

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia N° 234

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE
PISOS DE CONCRETO SUBMETIDA A CARGAS DINÂMICAS**

MARCELO MATOS BRANDÃO

Esta monografia foi apresentada às 09 h30 do dia 28 de JULHO de 2022 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



Prof. M.Sc. Lucas da Mata Rocha Menezes

(IFS – Campus Aracaju)



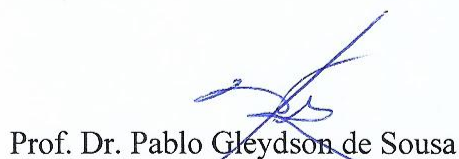
Prof. M.Sc. Fabio Wendell da Graça
Nunes

(IFS – Campus Aracaju)



Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho

(IFS – Campus Aracaju)
Orientador



Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa

(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

RESUMO

Na busca por melhoras nas condições estética do empreendimento, construção civil tem optado por estruturas mais leves, esbeltas e com maiores vãos, mostrando uma tendência a estruturas mais sensíveis a vibrações, principalmente em locais com elevadas cargas dinâmicas como é o caso de edifícios garagens e academias. Esse estudo tem por objetivo analisar a laje de academias que possuam atividades rítmicas em sua cartela de serviços, sendo praticados em lajes aéreas e de um edifício garagem, localizados no município de Aracaju, e realizar um estudo numérico-experimental comparativo das vibrações nelas, analisando parâmetros como frequência e aceleração e pico. Como mostrado em pesquisas anteriores o uso de aparelhos moveis de telefonia é uma alternativa simples e econômica para a obtenção dos dados de campo não prejudicando os dados finais. Posteriormente é realizado os cálculos para a determinação da frequência natural, através do método analítico, experimental e Método dos Elementos Finitos - MEF. Assim os resultados encontrados foram satisfatórios para compreensão da necessidade de considerar as cargas dinâmicas durante o dimensionamento, como forma de garantir conforto e a segurança das estruturas, além disto é imprescindível salientar a importância da análise das frequências naturais e das acelerações de pico das lajes a fim de promover um melhor conforto aos usuários.

Palavras-Chave: Vibrações – Lajes – Cargas Dinâmicas – Frequência Natural.

ABSTRACT

In the search for improvements in the aesthetic conditions of the enterprise, civil construction has opted for lighter, slender structures with greater spans, showing a tendency to structures more sensitive to vibrations, especially in places with high dynamic loads such as garages and gyms. This study aims to analyze the slab of gyms that have rhythmic activities in their service list, being practiced in aerial slabs and a garage building, located in the city of Aracaju, and to carry out a numerical-experimental comparative study of the vibrations in them, analyzing parameters such as frequency and acceleration and peak. As shown in previous researches, the use of mobile telephony devices is a simple and economical alternative for obtaining field data without harming the final data. Subsequently, the calculations are performed to determine the natural frequency, through the analytical, experimental and FEM method. Thus, the results found were satisfactory for understanding the need to consider dynamic loads during the design, as a way of ensuring comfort and safety of structures, in addition to this, it is essential to emphasize the importance of analyzing the natural frequencies of the slab in order to protect users. of problems that can collapse the structure.

Keywords: Vibrations – Slabs – Dynamic Loads – Natural Frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de Laje Steel Deck	19
Figura 2- Metodologia de Pesquisa.....	20
Figura 3- Aplicativo Accelerometer Analyzer.....	21
Figura 4 - Dados Obtidos Através do Aplicativo	22
Figura 5- Dados Exportados para o Excel.....	22
Figura 6- Demonstração da numeração das aferições e da conversão do tempo para segundos.....	23
Figura 7 - Eixo de análise dos acelerômetros em smartphones.....	24
Figura 8 - Demonstração do Uso da Transformada Rápida de Fourier.....	25
Figura 9 - Criação da coluna FFT Magnitude	26
Figura 10 - Criação da coluna frequência	27
Figura 11 - Laje do Edifício Garagem.....	29
Figura 12 - Dados Extraídos do Aplicativo Accelerometer Analyzer (Edifício Garagem)	30
Figura 13 - Frequência x Magnitude (Edifício Garagem).....	30
Figura 14 - Frequência x Magnitude (Ampliado) (Edifício Garagem)	31
Figura 15 - Aceleração de Pico pela Frequência (Edifício Garagem).....	32
Figura 16 - Representação da laje (Academia 01).	34
Figura 17 - Dados Extraídos do Aplicativo Accelerometer Analyzer (Academia 01) .	35
Figura 18: Frequência x Magnitude (Academia 01).....	36
Figura 19 - Relação da Frequência com a Aceleração (Academia 01)	37
Figura 20- Representação da laje (Academia 02)	39
Figura 21 - Dados Extraídos do Aplicativo Accelerometer Analyzer (Academia 02) .	40
Figura 22: Frequência x Magnitude (Academia 02).....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Cargas Devido ao Uso Segundo a NBR 6120/2019	11
Tabela 2 - Frequência crítica para vibrações verticais em casos de estruturas submetidas a vibrações por ações humanas	18
Tabela 4 - Formas modais e Frequências da laje (Edifício Garagem).	29
Tabela 5 - Resultados Edifício Garagem.....	32
Tabela 6 - Formas modais e Frequências da laje (Academia 01).	33
Tabela 7 - Resultados Academia 01	36
Tabela 8 - Formas modais e Frequências da laje (Academia 02)	38
Tabela 9 - Resultados Academia 02	41

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas de Trabalho
AISC	American Institute of Steel Construction
EDO	Equação Diferencial Ordinal
ICIST	Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção
ISO	International Standards Organization
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
RMS	Root Mean Square

LISTA DE SIMBOLOS

a	Aceleração
a_0	Aceleração de Pico (% da aceleração da gravidade)
h	Espessura efetiva da laje de concreto
f_{ck}	Feature Compression Know
f	Frequência
$f_{crítica}$	Frequência crítica
fn	Frequência natural
t	Intervalo de tempo entre os valores que os sinais de aceleração estão separados
λ	Lambda
L	Maior vão da laje
$[M]$	Matriz de massa
$[K]$	Matriz de rigidez
b	Menor vão da laje
α	Módulo de alfa
E	Módulo de elasticidade do concreto
n	Número correspondente a aferição;
α_e	Parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade
P	Período
$\{\ddot{u}\}$	Vetor de aceleração nodal
$\{u\}$	Vetor de deslocamento nodal
$\{0\}$	Vetor nulo.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVO.....	12
2.1.	<i>Objetivos Gerais</i>	12
2.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	12
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1.	<i>Dinâmica das Estruturas</i>	13
3.1.1.	<i>Carregamentos dinâmicos</i>	13
3.1.2.	<i>Período e frequência</i>	13
3.1.3.	<i>Regime Permanente e transitório</i>	13
3.1.4.	<i>Vibrações</i>	14
3.1.5.	<i>Frequência natural e vibração livre</i>	14
3.1.6.	<i>Proporção da Aceleração em Relação a Gravidade</i>	14
3.1.7.	<i>Amortecimento e amortecimento crítico</i>	16
3.1.8.	<i>Ressonância</i>	16
3.1.9.	<i>Método dos Elementos Finitos</i>	16
3.1.10.	<i>Análise modal</i>	16
3.1.11.	<i>Espectro</i>	17
3.1.12.	<i>Transformada Rápida de Fourier</i>	17
3.2.	<i>Limites Normativos</i>	17
3.3.	<i>Laje Steel deck</i>	18
3.4.	<i>Laje Maciça</i>	19
4.	METODOLOGIA.....	20
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1.	<i>Laje do Edifício Garagem</i>	29
5.2.	<i>Lajes das Academias</i>	33
6.	CONCLUSÃO	43
7.	REFERÊNCIA.....	44

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a construção civil vem sofrendo grandes transformações, tanto nos processos construtivos como nos *designers* dos empreendimentos. Estas mudanças estão mais visíveis na arquitetura e na estrutura, que vêm exigindo cada vez mais de seus projetistas. Estas mudanças são permitidas graças ao desenvolvimento da ciência dos materiais, através das melhorias das propriedades mecânicas dos materiais, desenvolvimento de metodologias mais eficazes de construção e novos modelos de processo buscando desenvolver a sustentabilidade nos projetos, menores custos e prazos.

Diante disso, é importante ressaltar as lacunas das normas brasileiras em relação à análise dinâmica de estruturas, tendo em vista que na norma de dimensionamento de estruturas de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014), considera fazer a substituição da carga dinâmica por uma carga estática equivalente, porém esta operação não considera as características dinâmicas intrínsecas às estruturas.

Segundo Lima (2007), existe uma busca na construção civil por estruturas mais leves, esbeltas e com maiores vãos, mostrando uma tendência a estruturas mais sensíveis a vibrações.

É imprescindível salientar que, de acordo com Junges (2010), a maioria dos engenheiros em exercício realizam apenas a análise estática da estrutura, substituindo as cargas dinâmicas por cargas estáticas equivalente e esse procedimento pode comprometer o conforto psicológico do usuário, que pode ser afetado pelo aparecimento de vibrações.

Segundo a NBR 6120 (ABNT, 2019), as cargas devido à utilização em residências e academias são as apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1- Cargas Devido ao Uso Segundo a NBR 6120/2019

Local	Utilização	Carga Uniformemente Distribuída (kN/m ²)
Residência	Dormitórios	1,5
	Sala, Copa e Cozinha	1,5
	Sanitário	1,5
	Despensa, Área de Serviço e Lavanderia	2,0
Quadra Esportiva		5,0
Academias		5,0

Fonte: Adaptada da NBR 6120 (ABNT, 2019).

Como observado na Tabela 1 as cargas acidentais provenientes de atividades físicas são maiores que as cargas de projeto de uma edificação comum, fazendo com que essa alteração de funcionalidade da edificação possa trazer riscos ou causar danos à estrutura.

Considerando as estruturas existentes, é possível realizar testes experimentais simplificados para obter as frequências naturais, posteriormente as acelerações de picos e em casos de vibrações excessivas, propor técnicas de remediação para melhorar o desempenho da estrutura. Quando uma estrutura considera as vibrações na fase de projeto, as frequências naturais podem ser obtidas através de métodos teóricos ou numéricos.

Para que um edifício forneça o máximo desempenho após as mudanças no seu projeto deve ser concebido não apenas análises estáticas, mas também com análises dinâmicas. Também é importante entender como as estruturas existentes comportam-se quando submetidas a forças dinâmicas, pois os padrões de uso desses espaços podem ser alterados.

Neste último caso, os ensaios dinâmicos experimentais são importantes, pois com eles é possível obter parâmetros dinâmicos da estrutura, fatores que não podem ser obtidos por meio de análise estática, a complementar a avaliação da integridade da estrutura e contribuindo para a tomada de decisões.

Embora estudos científicos (Junges (2010) e Lima (2007)) e normas internacionais (Murray et al. (2016) (2016) e ISO 2631-2 (1989)) já apontam que as vibrações das estruturas interferem no bem-estar dos usuários, a análise das propriedades dinâmicas (modos de vibração e frequências naturais) não é corriqueiramente discutida nos cursos de graduação em Engenharia Civil. Além disso, as normas brasileiras abordam o tema de modo superficial, como as NBR 8800 (2008)

e a NBR 15575 (2013).

2. OBJETIVO

2.1. Objetivos Gerais

A partir dessas observações, esta monografia tem como objetivo geral analisar a laje de academias que possuam atividades rítmicas em sua cartela de serviços, sendo praticados em lajes aéreas e de um edifício garagem, localizados no município de Aracaju, e realizar um estudo numérico-experimental comparativo das vibrações nelas.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Realizar numericamente a análise modal das estruturas, para a obtenção dos modos de vibração e das frequências naturais;
- b) Realizar, quando aplicável, a análise analítica das estruturas para a obtenção da menor frequência natural;
- c) Realizar análises experimentais com base em dados obtidos com acelerômetro para tentar obter as frequências naturais das estruturas (aplicando a Transformada Rápida de Fourier);
- d) A partir dos resultados obtidos através da Transformada Rápida de Fourier, calcular a aceleração de pico em relação a gravidade.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Dinâmica das Estruturas

De acordo com a Murray *et al.* (2016), para a compreensão das avaliações das vibrações em lajes é necessário entender alguns conceitos.

3.1.1. Carregamentos dinâmicos

A NBR 6120 (ABNT, 2014) considera o carregamento dinâmico cargas provenientes do uso da edificação que podem causar choques ou vibrações. Segundo o Murray *et al.* (2016) as cargas dinâmicas se dividem em 3 tipos:

- 1- Cargas harmônicas ou senoidais: estão geralmente associadas a máquinas rotativas.
- 2- Cargas periódicas: são causadas por atividades humanas rítmicas, tais como dança e aeróbica e por máquinas de impacto.
- 3- Cargas transitórias causadas pelo movimento desordenados de pessoas e incluir andar e correr.

3.1.2. Período e frequência

Halliday (2016) afirma que o período é o tempo necessário para completar um ciclo, enquanto a frequência, é o número de vezes que um fenômeno se repete em um determinado tempo. De acordo com Halliday (2016), a frequência é o inverso do período, demonstrado na Fórmula 1 (Halliday, 2016).

$$f = \frac{1}{P} \quad (1)$$

Sendo:

f =Frequência (Representada no S.I. com a unidade Hz (hertz));

P = Período (Representada no S.I. com a unidade s (segundos))

3.1.3. Regime Permanente e transitório

Murray *et al.* (2016), caracteriza um movimento de estado estável como sendo o movimento resultante a partir da aplicação de uma força motriz harmônica regular em um sistema estrutural, tendo este movimento uma frequência constante e amplitude máxima do movimento constante. Em caso de aplicação de uma carga variável na estrutura o amortecimento da estrutura fará com que este movimento

diminua, sendo este um tipo de movimento transitório.

3.1.4. Vibrações

Segundo o Murray et al. (2016) a reação das pessoas diante das vibrações depende muito do que estão fazendo para causá-las. Diante disso, ressalta que pessoas em escritórios ou em residências relatam desconforto devido vibrações “perceptíveis” (entendendo como perceptíveis os picos de aceleração de cerca de 0,5% da aceleração da gravidade), enquanto pessoas que participam numa atividade física toleram vibrações até 10 vezes maior (5% da aceleração da gravidade).

3.1.5. Frequência natural e vibração livre

Silva (2016) afirma que um sistema em vibração livre tenderá a vibrar em certa frequência predominante, que é denominada como frequência natural do sistema. Todas as estruturas têm um grande número de frequências naturais, a frequência natural mais baixa é a de maior preocupação, e é chamada de frequência fundamental do sistema.

3.1.6. Proporção da Aceleração em Relação a Gravidade

Um exemplo para o limite de aceleração de pico é de 0,5% da aceleração gravidade e é utilizado para escritórios e residências com frequência fundamental na faixa de 4,0 a 8,0 Hz. A ISO 2631-2 (1989), não traz limites bem definidos para as vibrações.

A ABNT NBR 8800 (ABNT, 1986) recomenda que a aceleração de pico, na falta de dados experimentais, pode ser determinada pelas Fórmulas 2 e 3 abaixo, expressas em razão da aceleração da gravidade (NBR 8800, 1986):

$$a_p = \frac{68800 * fn}{L * h * (h + 25,4)} \text{ para concreto normal.} \quad (2)$$

$$a_p = \frac{88500 * fn}{L * h * (h + 25,4)} \text{ para concreto leve.} \quad (3)$$

Sendo:

fn : frequência natural (Hz);

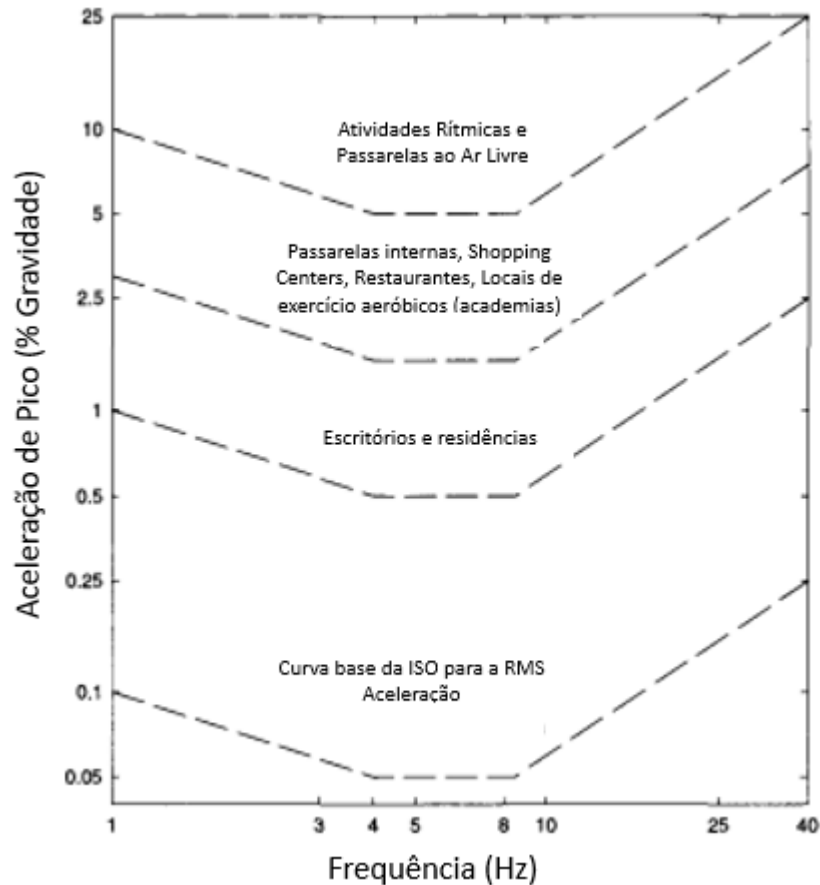
L : Vão (m);

h : espessura efetiva da laje de concreto (mm).

Consoante a ISO 2631-2 (AISC, 1989), é importante ressaltar que as

acelerações obtidas devem ser limitadas de acordo com a finalidade da construção, sendo as acelerações limites representadas a partir da linha base (RMS Acceleration), como demonstrada no Gráfico 01:

Gráfico 01: Acelerações Limites em Relação a Gravidade.



Fonte: Adaptada da ISO 2631-2 (AISC,1989).

A curva RMS (Root Mean Square – raiz da média dos quadrados, também chamado de valor eficaz) indica o nível de energia das vibrações. A curva RMS é demonstrada na Fórmula 4 (AISC ISO 2631-2) abaixo:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (4)$$

Sendo:

a = acelerações medidas ao longo do tempo;

n = número de acelerações obtidas durante o ensaio.

A curva base que delimita as acelerações RMS, é um critério estabelecido pela ISO 2631-2 (1989) para determinar o conforto dos ocupantes diante das vibrações, onde são consideradas o tipo de construção e a sua utilização.

3.1.7. Amortecimento e amortecimento crítico

Segundo Lexico (2009), O amortecimento é o ato de reduzir o efeito do choque ou pancada.

Segundo Lago (2019) como o amortecimento varia de um sistema para outro, estudos baseados em dados históricos trazem valores apropriados de amortecimento para determinada aplicação, definidos como uma porcentagem do amortecimento crítico. o amortecimento crítico é a quantidade de amortecimento necessária para que o sistema retorne à posição de equilíbrio sem qualquer oscilação

3.1.8. Ressonância

Lago (2019) descreve a ressonância como sendo um fenômeno que pode ser observado quando a frequência de um carregamento, que esta excitando a laje, se aproxima da frequência natural da estrutura analisada, fazendo com que a estrutura oscile com maior amplitude, podendo ocasionar o seu colapso.

3.1.9. Método dos Elementos Finitos

Soriano (2019) cita que o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi desenvolvido com o objetivo de realizar análises estáticas de estruturas, porém, o desenvolvimento computacional ampliou suas aplicações significativamente. Assim, através de simulações computacionais, o MEF tem permitido averiguar o comportamento das estruturas submetidas a diversos fenômenos físicos. Devido à sua eficiência, tornou-se uma das principais ferramentas para a solução desde sistemas simples até os mais complexos que possuem difícil solução através de métodos analíticos.

3.1.10. Análise modal

Segundo Bolina (2014), é um processo constituído de técnicas e experimentos que permitem a determinar o comportamento dinâmico do sistema em estudo a fim de determinar seus parâmetros modais. Tendo como parâmetros modais as frequências naturais e formas de modo de vibração de uma estrutura.

Essa análise pode ser feita com a equação básica do movimento, dada pela Fórmula 5 (LIMA, 2007), para sistemas não amortecidos e em vibração livre.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (5)$$

Sendo:

[M] = matriz de massa;

[K] = matriz de rigidez;
 $\{\ddot{u}\}$ = vetor de aceleração nodal;
 $\{u\}$ = vetor de deslocamento nodal;
 $\{0\}$ = vetor nulo.

3.1.11. Espectro

O Murray et al. (2016) caracteriza o espectro como sendo a demonstração da variação da amplitude relativa com a frequência.

3.1.12. Transformada Rápida de Fourier

A FFT (Fast Fourier Transform) é um algoritmo que calcula a Transformada discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa (Teorema inverso de Fourier). A análise de Fourier converte um sinal no domínio do tempo para uma representação no domínio da frequência e vice-versa. Neste caso o uso da FFT tem o objetivo de passar do domínio do tempo para o domínio da frequência, pois no domínio da frequência é possível identificar com clareza as frequências naturais.

Segundo Monteiro (2013), a Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform) utilizada através do Excel é dotada de uma rapidez não usual, porém o número de pontos dados nos domínios originais e da transformada seja uma potência inteira do número 2, como exemplo 128, 256, 512, 1024 e assim por diante, se limitando a 4096 pontos de dados.

3.2. Limites Normativos

A NBR 8800 (2008) traz como consideração geral que a utilização de estruturas de piso com longos vãos e amortecimento reduzido podem causar prejuízo ao funcionamento de equipamentos ou desconforto durante atividades humanas normais, por isso para estados limites de serviço deve-se utilizar combinações frequentes de serviço durante sua projeção.

Além disso, de acordo com NBR 8800 (2008), em nenhum caso a frequência fundamental da estrutura de um piso pode ser inferior a 3 Hz.

Moura (2019) afirma que toda estrutura que entra em um estado de vibração pode ser analisada como um sistema massa mola, assim podendo essa estrutura ser analisada através de uma equação diferencial ordinária (EDO).

Segundo a NBR 6118 (2014), as cargas dinâmicas podem provocar estados limites últimos ou estados limites de serviço por fadiga ou por vibração excessiva.

Para garantir a segurança das estruturas deve-se afastar a frequência natural da estrutura da frequência crítica, onde deve ser respeitada a condição de que a frequência crítica seja ao menos 20 (vinte) por cento maior que a frequência natural da estrutura.

“Quando a estrutura, pelas suas condições de uso, está sujeita a choques ou vibrações, os respectivos efeitos devem ser considerados na determinação das solicitações e a possibilidade de fadiga deve ser considerada no dimensionamento dos elementos estruturais” (ABNT NBR 6118:2014)

Considerando uma análise dinâmica mais acurada durante o dimensionamento de uma estrutura, a NBR 6118 (2014) determina que na ausência de valores experimentais pode-se utilizar os valores descrito na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Frequência crítica para vibrações verticais em casos de estruturas submetidas a vibrações por ações humanas

Caso	Frequência crítica (Hz)
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concertos sem cadeiras fixas	7,0
Passarela de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concertos com cadeiras fixas	3,5

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT,2014).

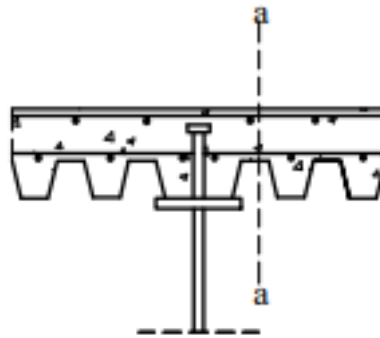
Muitos aparelhos celulares Android existentes no mercado podem ser utilizados como ferramenta na realização da análise das vibrações em lajes. Lagos (2019) afirma que em uma análise realizada por um acelerômetro de aparelho celular e um acelerômetro convencional, a diferença de resultados é inferior a 1 (um) por cento, não afetando a validade dos dados encontrados.

3.3.Laje Steel deck

Segundo Inson (2022), o steel deck é uma laje que possui em sua composição forma nervurada de aço galvanizado, conectores, armadura e concreto. Estruturas como estas possuem um piso mais esbelto sendo mais suscetíveis a vibrações.

Modelo de laje Steel Deck demonstrado na Figura 1:

Figura 1 - Modelo de Laje Steel Deck



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

3.4. Laje Maciça

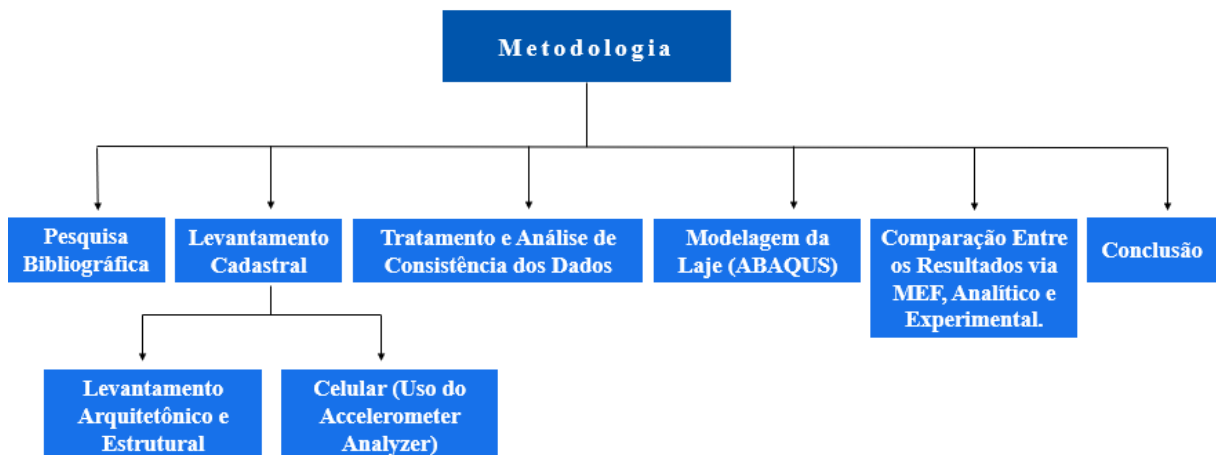
Segundo Carvalho (2013), compreende-se como Laje, estruturas de concreto de superfícies planas em que sua dimensão perpendicular à superfície, popularmente denominada de espessura, é relativamente pequena quando comparada a suas outras duas dimensões (largura e comprimento) estando sujeitas principalmente a ações perpendiculares (normais) a seu plano.

O pavimento de uma edificação é o um elemento estrutural de superfície que pode ser projetado com elementos pré moldados ou moldados no local. Dentre as lajes modeladas no local pode ser composto por uma laje única (maciças ou nervurada), sem vigas, ou por um conjunto de lajes, maciças ou nervuradas apoiadas em vigas. De acordo a Carvalho (2013), lajes maciças de concreto armado são placas de concreto apoiadas em vigas em seu entorno.

4. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa segue o fluxograma apresentado na Figura 02:

Figura 2- Metodologia de Pesquisa



Fonte: Autor Próprio.

Na etapa de pesquisa bibliográfica consiste na realização de um levantamento de bibliografias relacionadas ao tema abordado e analisado diferentes pontos e vista sobre vibrações em lajes de concreto.

Logo em seguida realizado o trabalho de campo que inclui seleção da laje de uma academia preferencialmente que possua utilização para execução de exercícios aeróbicos, como dança, outra laje com utilização voltada a estacionamento de veículos.

A parte de levantamento cadastral consiste no levantamento das dimensões das partes estruturais e arquitetônicas da laje, como o tipo de laje, os vãos livres, a espessura da laje, entre outros valores relevantes à análise vibracional.

A partir do levantamento dos dados dos elementos arquitetônicos e estruturais obtidos durante a visita aos pavimentos, realizar a modelagem da laje no software Abaqus, utilizando o modelo dos elementos finitos e a partir de uma análise modal determinando as menores frequências naturais e modos de vibração associados.

Assim quando for possível, o cálculo da frequência natural é realizado seguindo o FELDMANN (2022). O mesmo contempla o cálculo da frequência natural de lajes maciças retangulares levando em consideração a forma de apoio ao qual a estrutura

esteja submetida.

Dentro da etapa de trabalho em campo, dado início à análise das vibrações a partir de um aparelho celular Redmi Note 8 (2021) com o uso do software Accelerometer Analyzer, demonstrado na Figura 03, disponibilizado para Android de maneira gratuita, esse aplicativo permite registrar o histórico de acelerações da laje.

Figura 3- Aplicativo Accelerometer Analyzer



Fonte: Google Play.

Com as acelerações extraídas pelo aparelho celular “*in loco*”, este aplicativo permite a exportação do arquivo apenas em texto (formato .txt), tornando necessário o tratamento dos dados em outra plataforma, neste caso foi adotado o software Excel com o objetivo de facilitar a geração de gráficos e a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Além disso, vale ressaltar que a (FFT) é uma ferramenta crucial para a transposição do domínio tempo para o domínio frequência. Para demonstração dos resultados obtidos no celular serão traçados gráficos tempo versus aceleração e frequência versus magnitude.

O tratamento dos dados no Excel será dividido em 6 passos:

Primeiro passo: Será a extração das acelerações do formato .txt para o Excel, mostrado nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Dados Obtidos Através do Aplicativo

```

Arquivo  Editar  Exibir

# Started @Wed May 04 18:47:08 GMT-03:00 2022
#
#
# sensor Vendor: bmi160_acc
# sensor Name: ACCELEROMETER
# sensor Resolution: 0.0012m/sec^2; Max Range: 78.453606; Min Delay: 5000 microseconds
# The sensor's attributes are the result hardware and the Android capabilities.
# It means that the Android may not utilize all features provided by the hardware.
#
# Some devices and Android versions save battery too much so the device may go to sleep.
# It just happens after couple of minutes from turning off the scree and it is easy to find it out.
#
# The following file provides the data from accelerometer in the m/s^2 format.
# The diff value is just a time delta between the samples
#
#
# data format:
# so we have 4 columns with values separated by the " "
# X Y Z time_from_previous_sample(ms)

# sensor speed set to: FASTEST
# units set to: m/sec^2
# gravity filtered out
# Accuracy: HIGH
0.848 -0.113 9.124 0
0.815 -0.208 8.147 4
0.734 -0.118 7.514 5
0.625 -0.089 6.651 5
0.548 -0.041 5.986 5
0.495 -0.131 5.431 5
0.457 -0.118 4.743 5
0.46 -0.02 4.366 5
0.32 0.002 3.942 5
0.285 0.015 3.544 5

Ln 7, Col 87

```

Fonte: Autor Próprio.

Figura 5- Dados Exportados para o Excel

16	#								
17	#								
18	# data format:								
19	# so we have 4 columns with values separated by the " "								
20	# X Y Z time_from_previous_sample(ms)								
21									
22	# sensor speed set to: FASTEST								
23	# units set to: m/sec^2								
24	# gravity filtered out								
25	# Accuracy: HIGH								
26	0.848 -0.113 9.124 0								
27	0.815 -0.208 8.147 4								
28	0.734 -0.118 7.514 5								
29	0.625 -0.089 6.651 5								
30	0.548 -0.041 5.986 5								
31	0.495 -0.131 5.431 5								
32	0.457 -0.118 4.743 5								
33	0.46 -0.02 4.366 5								
34	0.32 0.002 3.942 5								
35	0.285 0.015 3.544 5								
36	0.375 -0.003 3.174 5								
37	0.275 0.005 2.928 5								
38	0.289 -0.137 2.566 5								
39	0.244 -0.052 2.335 5								
40	0.226 -0.019 2.082 5								
41	0.167 -0.073 1.975 5								
42	0.135 -0.007 1.756 5								
43	0.102 -0.017 1.477 5								

Planilha1

Pronto Acessibilidade: tudo certo

Fonte: Autor Próprio.

Segundo passo: O software Accelerometer Analyzer traz em seus resultados o tempo de cada aferição em ms (milissegundos), sendo assim foi convertido para segundos.

Terceiro passo: Cada aferição receberá um número equivalente à sua ordem de aferição, considerando que a primeira aferição será a aferição 0, coluna nomeada com o nome Aferição. Demonstrado na Figura 6.

Figura 6- Demonstração da numeração das aferições e da conversão do tempo para segundos

	A	B	C	D	E
		Aferição	Tempo (s)	Aceleração (m/s ²)	Tempo entre aferições (ms)
1					
2		0	0	9,206	0
3		1	0,004	8,2	4
4		2	0,009	7,501	5
5		3	0,014	6,65	5
6		4	0,019	6,036	5
7		5	0,024	5,344	5
8		6	0,029	4,875	5
9		7	0,034	4,385	5
10		8	0,039	3,992	5
11		9	0,044	3,45	5
12		10	0,049	3,245	5
13		11	0,054	2,817	5
14		12	0,059	2,598	5
15		13	0,064	2,301	5
16		14	0,069	2,026	5
17		15	0,074	1,817	5
18		16	0,079	1,693	5
19		17	0,084	1,55	5
20		18	0,089	1,438	5

Fonte: Autor Próprio.

Quarto passo: Separação de cada aferição em uma coluna, levando em consideração que a única coluna utilizada será a coluna que apresenta as acelerações no eixo Z. Assim como demonstrado na Figura 7, abaixo:

Figura 7 - Eixo de análise dos acelerómetros em smartphones



Fonte: Decon (2022).

Quinto passo: Criação de uma nova coluna denominada FFT complexos, com os resultados da aplicação da transformada rápida de Fourier, a partir das acelerações obtidas em campo, demonstrado na Figura 8. Sendo imprescindível reafirmar a limitação do Excel para uso da transformada rápida de Fourier a 4096 dados. Sendo assim, foi adotado um tempo de análise igual a aproximadamente 20,48 segundos, que foi obtido da multiplicação das 4096 amostras extraídas em campo pelo intervalo médio de leitura de 0,005 segundos.

Figura 8 - Demonstração do Uso da Transformada Rápida de Fourier

	A	B	C	D	E	F
		Aferição	Tempo (s)	Aceração (m/s ²)	Tempo entre aferições (ms)	FFT Complexa
1						
2		0	0	9,206	0	91,63
3		1	0,004	8,2	4	91,6099990109563-1,31273538051032i
4		2	0,009	7,501	5	91,5059054438739-2,46202740391836i
5		3	0,014	6,65	5	91,5065928553583-3,96882632917883i
6		4	0,019	6,036	5	91,2586067529578-5,05870441359781i
7		5	0,024	5,344	5	91,4224726033455-6,36077173081778i
8		6	0,029	4,875	5	90,9225291105082-7,71102385669897i
9		7	0,034	4,385	5	90,7175008042838-9,15175218918274i
10		8	0,039	3,992	5	90,0388787792703-9,69048292356687i
11		9	0,044	3,45	5	90,1132660436041-11,0491725643161i
12		10	0,049	3,245	5	90,4089952491675-11,9003647311986i
13		11	0,054	2,817	5	89,4493707678106-13,7345230115935i
14		12	0,059	2,598	5	89,1098415897718-14,0283233640496i
15		13	0,064	2,301	5	88,9379366344346-15,8686029299465i
16		14	0,069	2,026	5	88,0010624012787-16,5738074360942i
17		15	0,074	1,817	5	87,5306602926847-17,9893705544739i
18		16	0,079	1,693	5	87,4601712590265-18,826868454986i
19		17	0,084	1,55	5	87,2144346082189-20,6863047036504i
20		18	0,089	1,438	5	85,4586153107299-20,9826216604704i

Fonte: Autor Próprio.

Sexto passo: Criação de uma nova coluna denominada FFT Magnitude, onde trará os resultados das magnitudes de cada aceleração (MONTEIRO e BENTO, 2013), a partir da coluna FFT Complexos, como na Figura 9. Seguindo a Fórmula 06 (MONTEIRO e BENTO, 2013):

$$FFT\ Magnitude = \frac{IMAB(FFT\ COMPLEXA) * 2}{4096} \quad (6)$$

Figura 9 - Criação da coluna FFT Magnitude

	A	B	C	D	E	F	G
		Aferição	Tempo (s)	Aceleração (m/s²)	Tempo entre aferições (ms)	FFT Complexa	FFT Magnitude
1							
2		0	0	9,206	0	91,63	0,044741211
3		1	0,004	8,2	4	91,6099990109563-1,31273538051032i	0,044736037
4		2	0,009	7,501	5	91,5059054438739-2,46202740391836i	0,044696787
5		3	0,014	6,65	5	91,5065928553583-3,96882632917883i	0,044722959
6		4	0,019	6,036	5	91,2586067529578-5,05870441359781i	0,044628275
7		5	0,024	5,344	5	91,4224726033455-6,36077173081778i	0,044747794
8		6	0,029	4,875	5	90,9225291105082-7,71102385669897i	0,044555139
9		7	0,034	4,385	5	90,7175008042838-9,15175218918274i	0,044520486
10		8	0,039	3,992	5	90,0388787792703-9,69048292356687i	0,044218188
11		9	0,044	3,45	5	90,1132660436041-11,0491725643161i	0,044330143
12		10	0,049	3,245	5	90,4089952491675-11,9003647311986i	0,044525802
13		11	0,054	2,817	5	89,4493707678106-13,7345230115935i	0,044188312
14		12	0,059	2,598	5	89,1098415897718-14,0283233640496i	0,044046535
15		13	0,064	2,301	5	88,9379366344346-15,8686029299465i	0,044112554
16		14	0,069	2,026	5	88,0010624012787-16,5738074360942i	0,043724701
17		15	0,074	1,817	5	87,5306602926847-17,9893705544739i	0,043632879
18		16	0,079	1,693	5	87,4601712590265-18,826868454986i	0,04368339

Fonte: Autor Próprio.

Sétimo passo: será calculada a frequência em Hz, seguindo a Fórmula 7 (MONTEIRO e BENTO, 2013):

$$f_n = \frac{n}{4096 * t} \quad (7)$$

Sendo:

n = número correspondente a aferição;

t = o intervalo de tempo médio entre os valores que os sinais de aceleração estão separados (neste caso como foram usado taxa de aquisição de 200 Hz, equivalente a uma leitura a cada 0,005 segundos);

Sendo representada como demonstra a Figura 10:

Figura 10 - Criação da coluna frequência

	A	B	C	D	E	F	G	H
		Aferição	Tempo (s)	Aceleração (m/s²)	Tempo entre aferições (ms)	FFT Complexa	FFT Magnitude	fn
1								
2		0	0	9,206	0	91,63	0,044741211	0
3		1	0,004	8,2	4	91,6099990109563-1,31273538051032i	0,044736037	0,048828
4		2	0,009	7,501	5	91,5059054438739-2,46202740391836i	0,044696787	0,097656
5		3	0,014	6,65	5	91,5065928553583-3,96882632917883i	0,044722959	0,146484
6		4	0,019	6,036	5	91,2586067529578-5,05870441359781i	0,044628275	0,195313
7		5	0,024	5,344	5	91,4224726033455-6,36077173081778i	0,044747794	0,244141
8		6	0,029	4,875	5	90,9225291105082-7,71102385669897i	0,044555139	0,292969
9		7	0,034	4,385	5	90,7175008042838-9,15175218918274i	0,044520486	0,341797
10		8	0,039	3,992	5	90,0388787792703-9,69048292356687i	0,044218188	0,390625
11		9	0,044	3,45	5	90,1132660436041-11,0491725643161i	0,044330143	0,439453
12		10	0,049	3,245	5	90,4089952491675-11,9003647311986i	0,044525802	0,488281
13		11	0,054	2,817	5	89,4493707678106-13,7345230115935i	0,044188312	0,537109
14		12	0,059	2,598	5	89,1098415897718-14,0283233640496i	0,044046535	0,585938
15		13	0,064	2,301	5	88,9379366344346-15,8686029299465i	0,044112554	0,634766
16		14	0,069	2,026	5	88,0010624012787-16,5738074360942i	0,043724701	0,683594
17		15	0,074	1,817	5	87,5306602926847-17,9893705544739i	0,043632879	0,732422
18		16	0,079	1,693	5	87,4601712590265-18,826868454986i	0,04368339	0,78125
19		17	0,084	1,55	5	87,2144346082189-20,6863047036504i	0,043766675	0,830078
20		18	0,089	1,438	5	85,4586153107299-20,9826216604704i	0,042967211	0,878906

Fonte: Autor Próprio.

Serão traçados os gráficos de aceleração em relação a tempo e gráficos da magnitude em relação a frequência, sendo considerado apenas a metade do gráfico de magnitude pois a FFT apresenta como reposta uma curva simétrica (MONTEIRO e BENTO, 2013).

Na análise do Gráfico da magnitude em relação a frequência é extraída a frequência natural onde é calculada a aceleração de pico em relação a gravidade, seguindo a Fórmula 2 (ABNT NBR 8800, 1986 e CAN3-S16.1, 1989):

$$a_0 = \frac{68800 \cdot f_n}{l \cdot h \cdot (h + 25,4)} \text{ para concreto normal} \quad (2)$$

Por fim será realizada uma análise das frequências naturais da laje, confrontando os resultados obtidos na modelagem via MEF das lajes com os resultados analíticos obtidos através dos cálculos das frequências e os resultados extraídos do aparelho celular e tratados no Excel.

Sendo de suma importância ressaltar que o FELDMANN (2022) utilizado para calculo analítico da frequência natural da estrutura não contempla lajes nervuradas mistas, sendo assim não será realizado o calculo analítico do edifício garagem, como demonstrado na Quadro 1 abaixo:

Quadro 1 - Resumo de Calculo das Frequência Naturais

Lajes	Numérico (MEF)	Analítico	Experimental
Academias	SIM	SIM	SIM
Edf. Garagem	SIM	NÃO	SIM

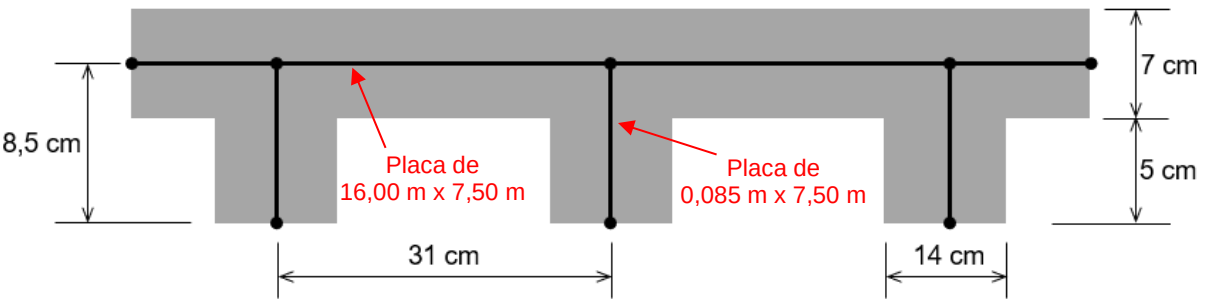
Fonte: Autor Próprio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1.Laje do Edifício Garagem

A laje adotada foi uma laje nervurada com nervuras em uma única direção, como mostra a Figura 11, discretizadas com elementos finitos do tipo *shell*.

Figura 11 - Laje do Edifício Garagem.



Fonte: Próprio autor.

5.1.1. Análise modal via MEF

A modelagem computacional foi realizada através do software Abaqus, seguindo dele foram extraídas as formas de modais e as frequências da laje como demonstradas na Tabela 3 abaixo. Sendo imprescindível ressaltar que a laje do edifício garagem foi modelada, utilizando elementos tipo casca (*Shell* tipo S4: elemento finito quadrilateral com 4 nós e integração cheia), tendo em vista que a laje era nervurada assim como demonstra a Figura 11.

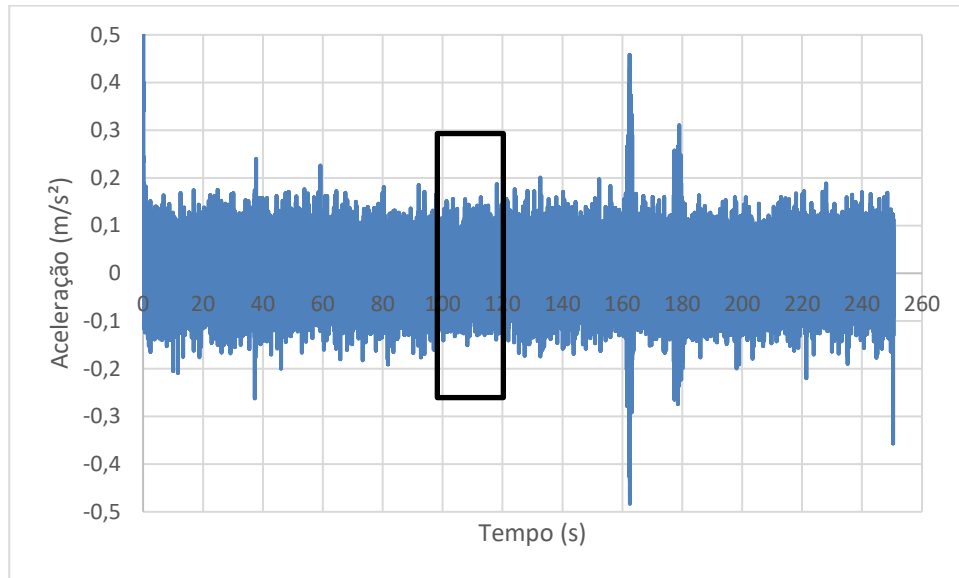
Tabela 3 - Formas modais e Frequências da laje (Edifício Garagem).

Modo 01	Modo 02	Modo 03
Frequência = 6,38 Hz	Frequência = 7,28 Hz	Frequência = 9,02 Hz

Fonte: Próprio autor.

5.1.2. Obtenção da menor frequência natural experimentalmente

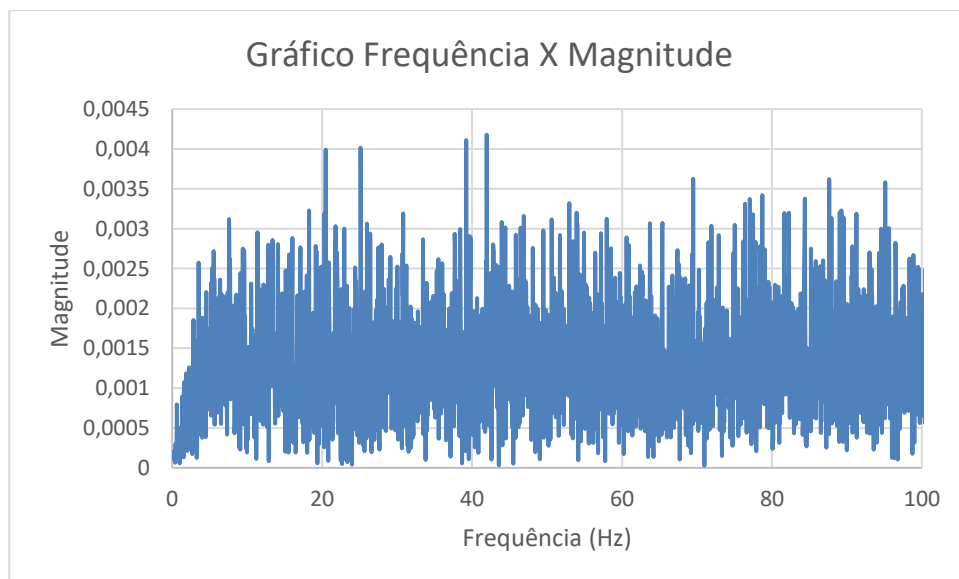
Figura 12 - Dados Extraídos do Aplicativo Accelerometer Analyzer (Edifício Garagem)



Fonte: Autor Próprio.

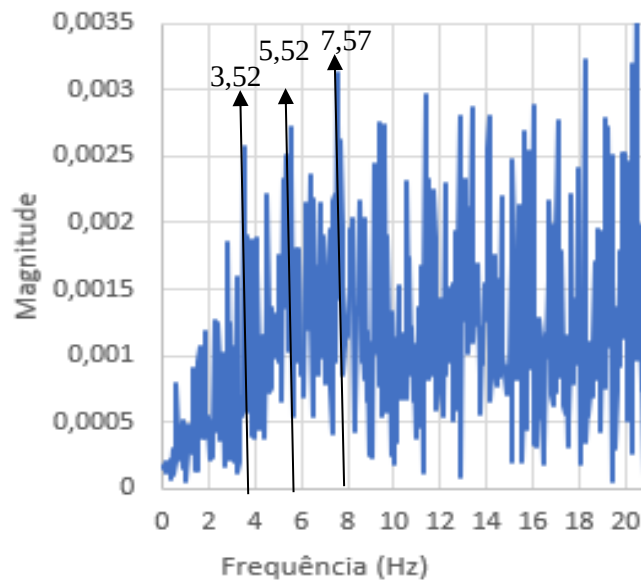
A área demarcada no gráfico representa a seleção de dados onde foi aplicada a Transformada Rápida de Fourier.

Figura 13 - Frequência x Magnitude (Edifício Garagem)



Fonte: Autor Próprio.

Figura 14 - Frequência x Magnitude (Ampliado) (Edifício Garagem)



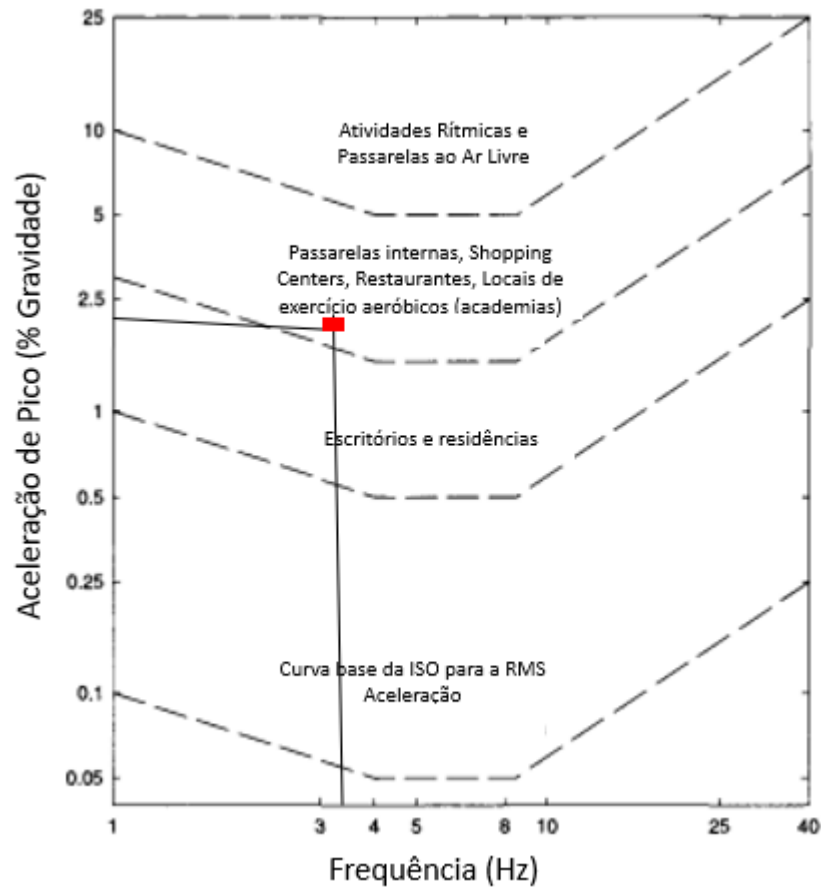
Fonte: Autor Próprio.

Calculando a aceleração de pico em relação a gravidade, seguindo a Fórmula 2 (ABNT NBR 8800, 1986 e CAN3-S16.1, 1989), demonstrada abaixo:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{68800 * 3,8}{16 * 70 * (70 + 25,4)}$$

$$\frac{a_p}{g} = 2,44\%$$

Figura 15 - Aceleração de Pico pela Frequência (Edifício Garagem)



Fonte: Adaptada da ISO 2631-2 (AISC,1989).

Assim os resultados das frequências naturais foram demonstrados na Tabela 4, apresentada abaixo.

Tabela 4 - Resultados Edifício Garagem

	MEF	Experimental
Frequência Fundamental	6,38 Hz	3,52 Hz

Fonte: Autor Próprio.

No levantamento de campo verificou-se que as lajes do edifício garagem possuem grandes vãos, o que atesta que as pequenas frequências naturais são relativamente baixas. Entretanto, as acelerações detectadas também foram relativamente baixas, o que sugere uma elevada rigidez da estrutura. De fato, essa estrutura é mista e suas conexões viga-pilares são parafusadas, o que, reconhecidamente, resulta razoáveis fatores de amortecimento (RAO, 2017).

5.2. Lajes das Academias

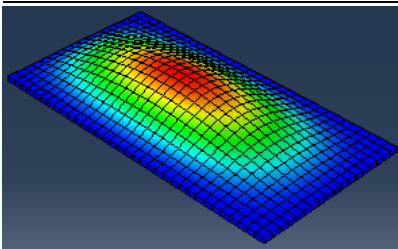
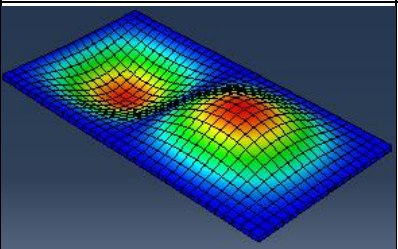
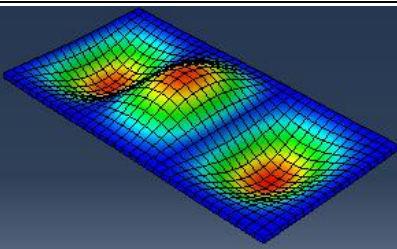
5.2.1. Laje da Primeira Academia

Com os dados obtidos em campo foi observado que a laje era simplesmente apoiada em um dos bordos e engastada nos outros 3 bordos. O concreto utilizado possui um f_{ck} igual a 25 MPa.

5.2.1.1. Análise modal via MEF

A modelagem computacional foi realizada através do software Abaqus, dele foram extraídas as formas de modais e as frequências naturais da laje, como demonstradas na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Formas modais e Frequências da laje (Academia 01).

Modo 01	Modo 02	Modo 03
		
Frequência = 34,594 Hz	Frequência = 43,911 Hz	Frequência = 61,657 Hz

Fonte: Próprio autor.

5.2.1.2. Obtenção da menor frequência natural analiticamente, segundo FELDMANN (2022).

Segundo a Fórmula 08 (NBR 6118,2014) abaixo, foi calculado o módulo de elasticidade do concreto (E_{cs}), válida para concretos com f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa.

$$E_{cs} = \left(0,8 + \frac{0,2 * f_{ck}}{80} \right) * \alpha e * 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad (8)$$

Sendo

$\alpha e = 1,2$ para basalto e diabásio

$\alpha e = 1,0$ para granito e gnaiss

$\alpha e = 0,9$ para calcário

$\alpha e = 0,7$ para arenito

Neste caso αe foi adotado como sendo igual a 1,0 para granito e gnaiss, por ser o

mineral em maior quantidade da região.

$$E = 24150 \text{ MPa ou } 2,415 * 10^{10} \text{ N/m}^2$$

Por conseguinte, foi feito o cálculo de lambda (λ), que é a relação entre l (maior dimensão da laje analisada) e b (menor dimensão da laje analisada), como demonstra a Fórmula 9 (BACHMANN, 1987). O modelo da laje calculada é apresentado na Figura 16.

$$\lambda = \frac{l}{b} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{320}{617} = 0,519$$

Figura 16 - Representação da laje (Academia 01).



Fonte: FELDMANN (2022).

Na imagem encontram-se representados os lados tracejados como sendo os lados que estão simplesmente apoiados e os lados representados com linhas contínuas sendo os lados que estão engastados.

Com o resultado obtido calculou-se o Módulo de Alfa (α), segundo a Fórmula 10 (Feldmann, 2022).

$$\alpha = 1,57 * \sqrt{5,14 + 2,92 * \lambda^2 + 2,44 * \lambda^4} \quad (10)$$

$$\alpha = 3,878$$

Para o cálculo da frequência natural da laje ainda se vê necessário calcular a massa por unidade de área em planta, sendo calculado pela Fórmula 11.

$$m = d * h \quad (11)$$

$$m = 2500 * 0,10 = 250 \text{ kg/m}^2 \text{ ou } 25 \text{ g/cm}^2$$

Sendo:

m = Massa da laje, em kg/m² (Calculada segundo a Fórmula 11);

d = Densidade da laje, kg/m³ (igual a 25, segundo a NBR 6120/2019);

h = Espessura da laje, em m.

Vale ressaltar que segundo a medição em campo a laje demonstra uma

espessura de 10 cm, com base nestes dados é feito o cálculo da Frequência natural a partir da Fórmula 12 (Feldmann, 2022):

$$f = \frac{\alpha}{l^2} * \sqrt{\frac{E * t^3}{12 * m * (1 - \nu^2)}} \quad (12)$$

$$f = 34,681 \text{ Hz}$$

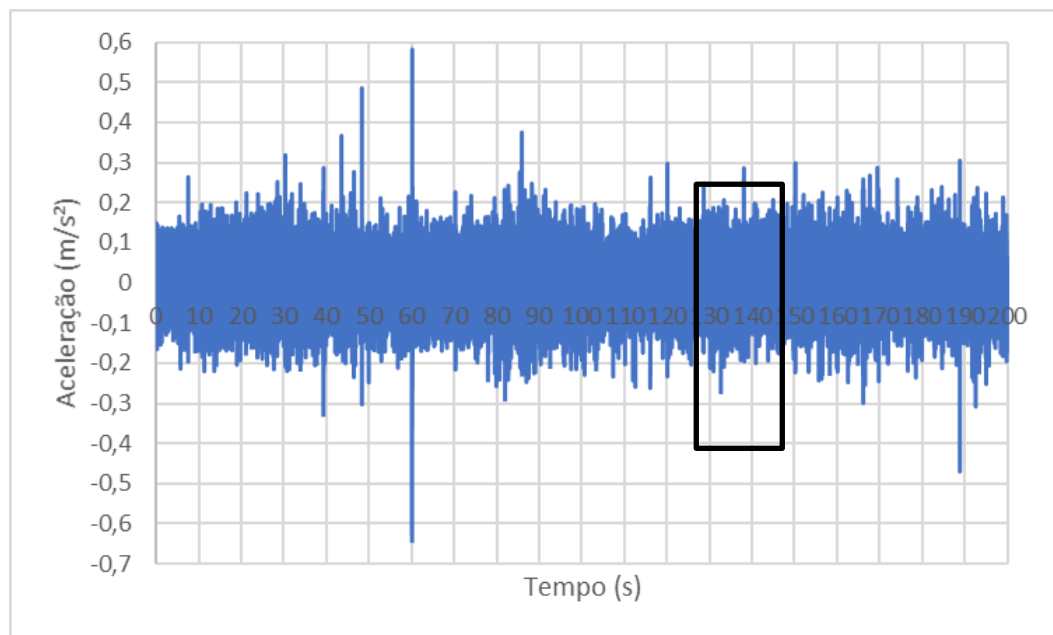
Sendo:

ν = Coeficiente de Poisson (Segundo a NBR 6118:2014, o mesmo é considerado igual a 0,2);

t = Espessura equivalente da laje, em metros;

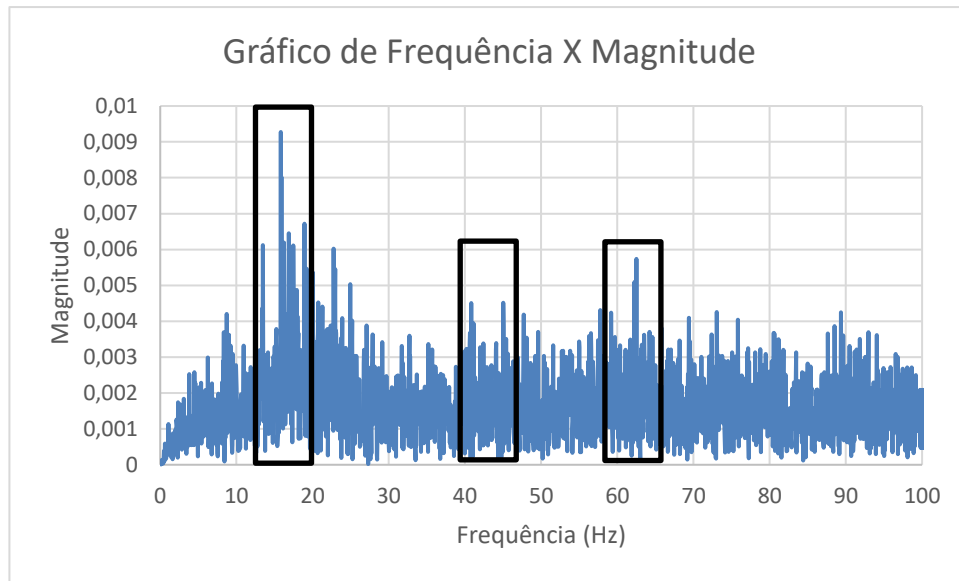
5.2.1.3. Obtenção da menor frequência natural experimentalmente

Figura 17 - Dados Extraídos do Aplicativo Accelerometer Analyzer (Academia 01)



Fonte: Autor Próprio.

A área demarcada no gráfico representa a seleção de dados onde foi aplicada a Transformada Rápida de Fourier.

Figura 18: Frequência x Magnitude (Academia 01)

Fonte: Autor Próprio.

No método analítico, o gráfico da frequência pela magnitude da Figura 18 mostrou que ocorrem modos de vibração para frequências em torno de 15,82 Hz, 40,82 Hz e 62,255 Hz. Esses valores são aproximados e extraídos de onde ocorre os pontos mais altos do gráfico, tendo como campo de análise as partes dos gráficos que mais tiveram frequências com as magnitudes elevadas.

Assim foi gerada a Tabela 6 com os resultados das frequências fundamentais das análises MEF, analítica e experimental.

Tabela 6 - Resultados Academia 01

	MEF	Analítica	Experimental
Frequência Fundamental	34,59 Hz	34,68 Hz	15,82 Hz

Fonte: Autor Próprio.

Calculando a aceleração de pico em relação a velocidade, usando a Fórmula 2 (ABNT NBR 8800, 1986 e CAN3-S16.1, 1989), temos:

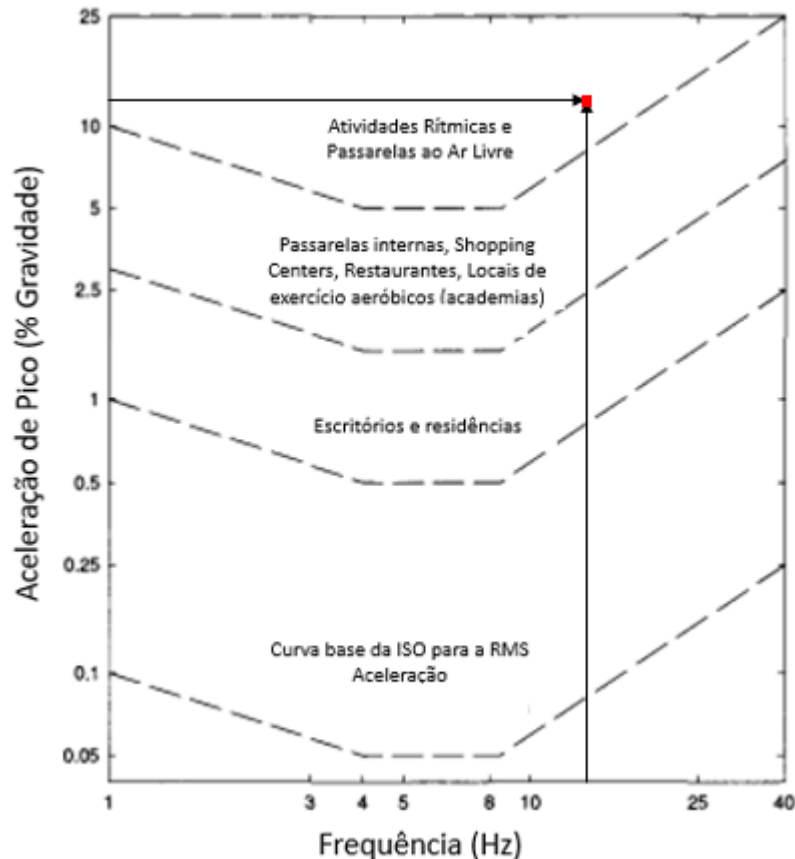
$$\frac{a_p}{g} = \frac{68800 * 15,63}{6,17 * 100 * (100 + 25,4)}$$

$$\frac{a_p}{g} = 13,90 \%$$

Assim observando a aceleração de pico e a frequência natural obtida foi localizado no Gráfico 01: Acelerações Limites em Relação a Gravidade demonstrada

na Figura 19 abaixo:

Figura 19 - Relação da Frequência com a Aceleração (Academia 01)



Fonte: Adaptada da ISO 2631-2 (AISC,1989).

Diante da relação entre a frequência e a aceleração de pico observa-se que segundo a NBR 8800 (1986) a laje tem a capacidade para a execução de atividades rítmicas.

Segundo a NBR 6118 (2014) a frequência crítica da laje é igual a 8,0 Hz, assim a norma afirma que a frequência natural deve ser maior que 1,2 vezes a frequência crítica. Sendo assim a frequência natural obtida atende a NBR 6118 (2014) como demonstra os cálculos da Fórmula 13 (ABNT NBR 6118,2014).

$$f_n = 1,2 * f_{crítica} \quad (13)$$

$$15,63 > 1,2 * 8,0$$

$$15,63 \text{ Hz} > 9,6 \text{ Hz}$$

Diante dos resultados pode se observar que houve uma variação muito grande entre os resultados obtidos em campo e os resultados teóricos, dentre os fatores que podem ter contribuído para essa divergência podemos citar:

- 1- A desconsideração das alvenarias de vedação interna e demais componentes não estruturais, que contribuem para o amortecimento;
- 2- A desconsideração do painel de piso, tendo em vista que esta laje adotava um acabamento cerâmico que contribui para a massa da estrutura;
- 3- A ausência de um projeto estrutural tendo em vista que o f_{ck} mensurado foi de 25 MPa, a consideração da classe de agressividade II de acordo com a NBR 12655 (2006) e NBR 6118 (2014).
- 4- A consideração de que os apoios da laje (vigas) foram considerados rígidos nas análises numéricas e analítica.

5.2.2. Laje da Segunda Academia

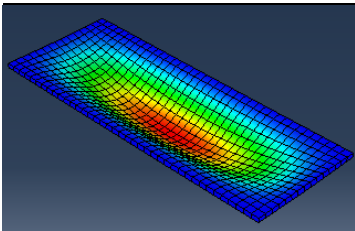
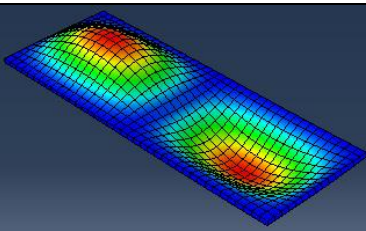
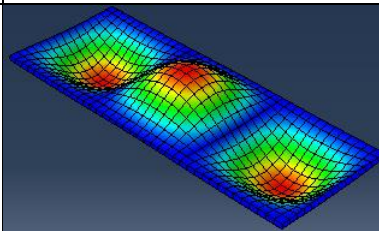
Com os dados obtidos em campo foi observado que a laje era simplesmente apoiada em dois bordos, ou seja, possui apoio em dois de seus lados e engastada nos outros 2 bordos.

As características do concreto utilizado foram adotadas de acordo com o projeto estrutural da academia, assim foi considerado concreto de f_{ck} igual a 25 MPa.

5.2.2.1. Análise modal via MEF

Assim como na laje anterior a modelagem computacional foi realizada através do software Abaqus, como demonstradas na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Formas modais e Frequências da laje (Academia 02)

Modo 01	Modo 02	Modo 03
		
Frequência = 58,228 Hz	Frequência = 64,660 Hz	Frequência = 77,313 Hz

Fonte: Próprio autor.

5.2.2.2. Obtenção da menor frequência natural analiticamente, segundo FELDMANN (2022).

Neste caso, como o f_{ck} do concreto desta laje foi igual ao f_{ck} do concreto da laje anterior foi usado o mesmo módulo da elasticidade.

$$E = 24150 \text{ MPa ou } 2,415 * 10^{10} \text{ N/m}^2$$

Como demonstrado no cálculo utilizando a Fórmula 3.

Por conseguinte, foi feito o cálculo de Lambida (λ) seguindo a Fórmula 9 demonstrada anteriormente. Sendo considerado as posições de engastes e apoio de acordo com a disposição representada na Figura 20.

$$\lambda = \frac{7}{2,635} = 2,657$$

Figura 20- Representação da laje (Academia 02)



Fonte: FELDMANN (2022).

Na imagem encontra-se representado os lados tracejados como sendo os lados que estão simplesmente apoiados e os lados representados com linhas contínuas sendo os lados que estão engastados.

Com resultado obtido calculou-se o Módulo de Alfa (α), segundo a Fórmula 14 (Feldmann, 2022).

$$\alpha = 1,57 * \sqrt{1 + 2,5 * \lambda^2 + 5,14 * \lambda^4} \quad (14)$$

$$\alpha = 26,018$$

Seguindo a Fórmula 11, demonstrada anteriormente foi calculada a massa da laje por unidade de área.

$$m = 2500 * 0,12 = 300 \text{ kg/m}^2$$

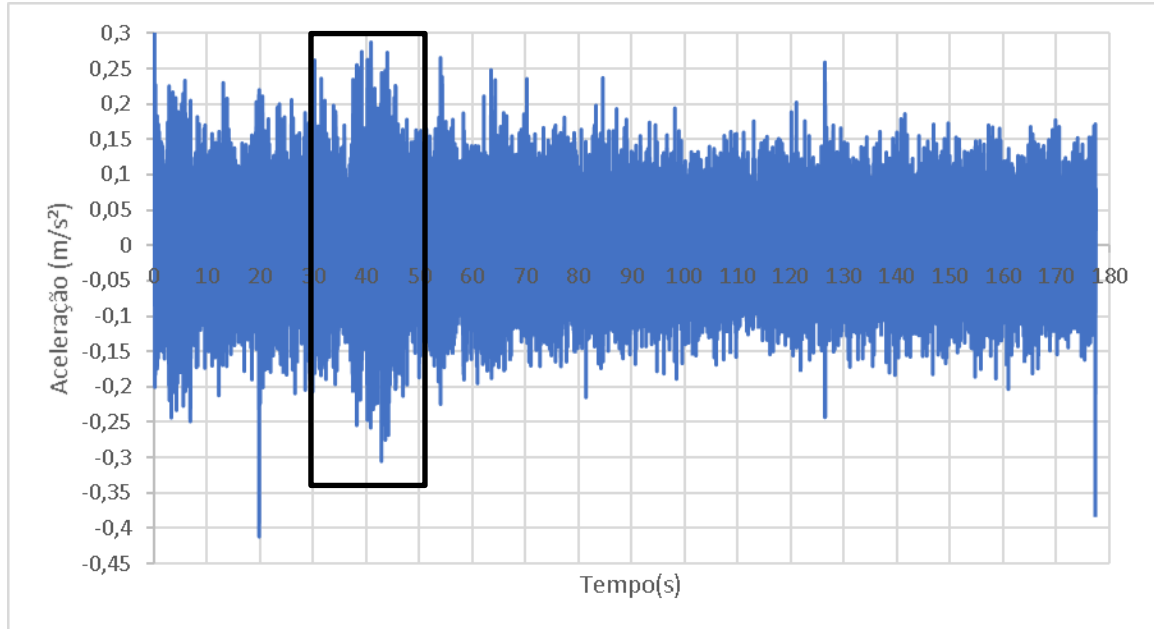
Vale ressaltar que o projeto da laje demonstra uma laje de 12 cm, com base nestes dados é feito o cálculo da Frequência natural de acordo com Fórmula 12 (Feldmann, 2022).

$$f = \frac{\alpha}{l^2} * \sqrt{\frac{E * t^3}{12 * m * (1 - \nu^2)}} \quad (12)$$

$$f = 58,348 \text{ Hz}$$

5.2.2.3. Obtenção da menor frequência natural experimentalmente

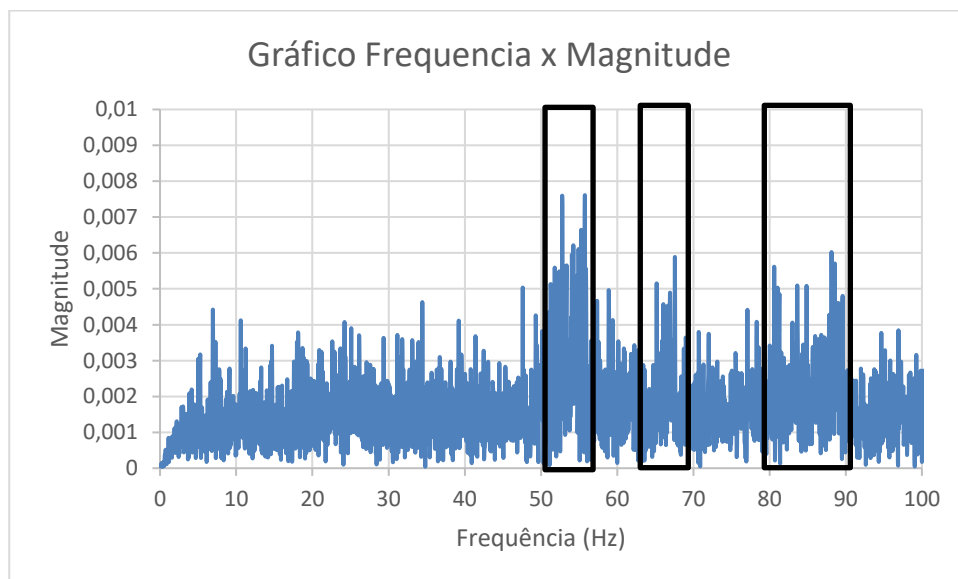
Figura 21 - Dados Extraídos do Aplicativo Accelerometer Analyzer (Academia 02)



Fonte: Autor Próprio.

Diante do método analítico, para a execução da Transformada Rápida de Fourier foi adotado intervalo de tempo demarcado na Figura 21 onde apresenta o gráfico da aceleração pelo tempo.

Figura 22: Frequência x Magnitude (Academia 02)



Fonte: Autor Próprio.

Na análise do método analítico, observando o gráfico da frequência pela magnitude conclui-se que ocorrem modos de vibração para frequências em torno de 55,76 Hz, 66,94 Hz e 81,20 Hz. Esses valores são aproximados e extraídos de onde ocorre os pontos mais altos do gráfico, tendo em vista as partes dos gráficos que mais tiveram frequências com as magnitudes elevadas.

Por fim os resultados da Academia 02 estão representados na Tabela 8, abaixo:

Tabela 8 - Resultados Academia 02

	MEF	Analítica	Experimental
Frequência Fundamental	58,22 Hz	58,35 Hz	55,76 Hz

Fonte: Autor Próprio.

Dentre os valores que ocorreram essa diferença do método MEF e Calculado para o método analítico pode ter sido dado pela diferença do projeto para a execução e/ou pela não consideração dos acabamentos como um painel de piso da laje tendo em vista que com a consideração de um painel de piso aumentaria o peso da laje onde segundo a Fórmula 12 (Cálculo da frequência), a frequência é inversamente proporcional a raiz quadrada da massa, sendo assim quanto maior a massa menor a frequência.

Calculando a aceleração de pico em relação a velocidade, usando a Fórmula 2 (ABNT NBR 8800, 1986 e CAN3-S16.1, 1989), temos:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{68800 * 55,76}{7 * 120 * (120 + 25,4)}$$

$$\frac{a_p}{g} = 31,41\%$$

Assim observando a aceleração de pico e a frequência natural obtida foi localizado não pode ser localizada no Gráfico 01 pois a aceleração de pico existente no gráfico contempla até 25% enquanto a aceleração se encontra em 31,41%. Vale ressaltar que os dados não se encontram no Gráfico 1, mas se considerado o prolongamento das linhas RMS existentes no gráfico com crescimento contante a laje se encontraria apta a realização de exercícios aeróbicos.

Seguindo a Fórmula 13 a frequência natural obtida atende a NBR 6118 (2014) como demonstra os cálculos abaixo.

$$55,76 > 1,2 * 8,0$$

$$55,76 \text{ Hz} > 9,6 \text{ Hz}$$

Diante dessa variação entre os métodos teóricos e o método experimental pode ser dado durante a execução, devido a falhas de adensamento ou modificação na estrutura através do uso de vedações internas que contribuem para o amortecimento da estrutura.

6. CONCLUSÃO

Foi possível realizar o estudo experimental, analítico e através do MEF tendo em vista que apesar da discrepância entre o resultado analítico e experimental da segunda academia, as estruturas apresentaram um resultado adequado quanto a sua utilização. Ambas academias no contexto da análise das vibrações mostraram ter uma estrutura satisfatório para a realização de exercícios aeróbicos.

A laje da primeira academia apresentou uma variação quando comparado os resultados de campo com os resultados da modelagem, diante disso recomenda-se considerar durante a modelagem o uso dos bordos deformáveis para representar as vigas de apoio das lajes, pois os apoios colaboram na deflexão total por serem flexíveis ou não completamente rígidos.

Na laje da segunda academia foi observado que a mesma possuía projeto estrutural, assim tornou mais fácil o levantamento cadastral da laje. Durante os ensaios em campo da segunda laje apesar das cargas provenientes das atividades em execução não apresentou vibrações perceptíveis aos usuários.

Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se:

- Analisar os fatores de amortecimento;
- Durante a modelagem considerar os bordos deformáveis, a partir da inserção das vigas que suportam as lajes;
- Realizar estudos experimentais com foco na obtenção da resposta dinâmica dos sistemas estruturais forçados, em termos de valores de deslocamentos e velocidade;
- Considerar os painéis de piso que estão sendo utilizados na estrutura tendo em vista que isso influi diretamente na massa da estrutura.

7. REFERÊNCIA

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto e Execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

BLEVINS, R. D. Formulas for dynamics, acoustics and vibrations. John Wiley & Sons, 2016.

Bolina, C.C.; Palechor, E. U. L.; Vásquez, M. P. R. **Vibrações: as frequências naturais estimada e experimental de uma estrutura**, p. 186-194. In: Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria Blucher Mathematical Proceedings, **v.1, n.1**]. São Paulo: Blucher, 2015. ISSN em breve, DOI 10.5151/mathpro-cnmai-0038.

CANADIAN STANDARTS ASSOCIATION. CAN3-S16. 1-M84: Steel Structures for Buildings - Limits States Design. Appendix G: Guide on Floor Vibrations. Ontario. 1989.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118. 2014. 4ª ed. São Carlos: Edufscar, 2015.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of structures. 3rd ed. **Computers & Structures**: Berkely, 1995.

DECON. **Acelerômetros: Uso Em Celulares E Detecção De Velocidade. Parte 1**. Link de Acesso: <<http://www2.decom.ufop.br/imobilis/acelerometros-uso-em->

celulares-e-deteccao-de-velocidade-parte-1/>. Acessado em 16 de julho de 2022.

EUROPEAN COMMISSION – TECHNICAL STEEL RESEARCH. **Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls**. RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006.

BACHMANN, Hugo, AMMANN. Walter. **Vibration of Structures induced by Man and Machines**. IABSE-AIPC-IVBH, Zürich 1987, ISBN 3-85748-052-X.

FELDMANN, Markus et al. **Design Guide for Floor Vibrations. ArcelorMittal Europe**. Disponível em:

<https://sections.arcelormittal.com/sections/repository/Sections/5_19_2_Vibration_web.pdf>.

Acesso em 03 de julho de 2022.

GOOGLE PLAY. **Accelerometer Analyzer**. Link de Acesso: <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lul.accelerometer&hl=pt&gl=US>>. Acessado em 30 de novembro de 2021.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. **Fundamentos de Física**, Volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica (tradução Ronaldo Sérgio de Biasi) – 10. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.

INSON, Nathalia. **O que é o steel deck? Vantagem, preço, e como usar no projeto**. Link de acesso: <<https://www.vivadecora.com.br/pro/steel-deck/>>. Acessado em 27 de fevereiro de 2022.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 2631-2** - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Human exposure to continuous and shockinduced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). Geneva, 1989.

JUNGES, Paulo. **Análise de vibrações de uma laje mista de concreto e perfis de PRFV induzidas por atividades humanas**. 2010. 331 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

LAGO, Fernanda Scussiato. **Estudo numérico e experimental de parâmetros de vibração em lajes de concreto**. 2019. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul.

LEXICO. **Significado de Amortecer - O que é e Conceito no Dicionário (lexico.pt)**.

Link de acesso: <<https://www.lexico.pt/amortecer/>>. Acesso em 30 de novembro de 2021.

LIMA, Paulo. **Controle de vibrações induzidas em uma laje de academia de ginástica com a utilização de amortecedores de massa sintonizados**. 2007. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de engenharia civil e ambiental. Universidade de Brasília, Distrito Federal.

MONTEIRO, M. BENTO, R. **Procedimento Experimental para a Realização de Ensaios de Caracterização Dinâmica de Estruturas**. Relatório ICIST DTC nº 05/2013, pp. 1-23. Abril de 2013. ISSN: 0871-7869.

MOURA, Tiago Rodrigues Coelho de. **Análise de vibração em lajes destinada às academias**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 10, Vol. 10, pp. 116-128. Outubro de 2019. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/analise-devibração>. Acessado em 30 de novembro de 2021.

MURRAY T. M. et al. **Steel Design Guide Series nº 11: Vibrations of Steel-Framed Structural Systems due to Human Activity**. 2 ed. American Institute of Steel Construction (AISC), USA, 2016.

RAO, S., **Mechanical Vibrations in SI Units**. 6ª ed. Miami, Pearson, 2017

SORIANO, H. L. **Elementos Finitos: Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.