

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JAKELINE LOUREIRO

**ESTUDO NUMÉRICO DA ABSORÇÃO VIBRACIONAL
CONSIDERANDO O EFEITO PERIÓDICO DE FUNDAÇÃO EM UMA
ESTRUTURA DE PEQUENO PORTE**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2023

JAKELINE LOUREIRO

**ESTUDO NUMÉRICO DA ABSORÇÃO VIBRACIONAL
CONSIDERANDO O EFEITO PERIÓDICO DE FUNDAÇÃO EM
UMA ESTRUTURA DE PEQUENO PORTE**

**Numerical Study of the Vibrational Absorption Considering The
Periodic Foundation Effect In A Small Structure**

Dissertação apresentado(a) como requisito para obtenção do título(grau) de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco**



JAKELINE LOUREIRO

ESTUDO NUMÉRICO DA ABSORÇÃO VIBRACIONAL CONSIDERANDO O EFEITO PERIÓDICO DE FUNDAÇÃO EM UMA ESTRUTURA DE PEQUENO PORTE

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Materiais E Engenharia De Estruturas.

Data de aprovação: 30 de Agosto de 2023

Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fabio Rodrigo Mandello Rodrigues, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rodrigo Borges Santos, Doutorado - Universidade Federal da Grande Dourados (Ufgd)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 02/10/2023.

Dedico este trabalho a minha família e aos meus
amigos, pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas e instituições às quais presto minha homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes e meu coorientador Prof. Dr. Paulo Rogério Novak que me mostraram os caminhos a serem seguidos e pela confiança depositada.

A minha família, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos da minha vida. Ao meu companheiro, pela compreensão e parceria.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Aos professores Fabio Rodrigo Mandello e Rodrigo Borges Santos pelas sugestões ao trabalho e pelos auxílios.

Encero agradecendo à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pelo auxílio financeiro.

"Tudo é vibração.- Albert Einstein

RESUMO

LOUREIRO, Jakeline. **ESTUDO NUMÉRICO DA ABSORÇÃO VIBRACIONAL CONSIDERANDO O EFEITO PERIÓDICO DE FUNDAÇÃO EM UMA ESTRUTURA DE PEQUENO PORTE**. 2023. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2023.

O crescimento das áreas urbanas tem levado as edificações a se aproximarem cada vez mais das vias de tráfego rodoviário. Esse cenário expõe as estruturas da construção civil, a vibrações geradas pelo fluxo de cargas, causando desconforto aos ocupantes dessas edificações e até mesmo danos estruturais, como fissuras e riscos de colapso. Embora existam estudos numéricos sobre as vibrações do tráfego, técnicas eficazes de isolamento vibracional são pouco exploradas nessas pesquisas. Uma abordagem promissora é o uso de estruturas periódicas, que funcionam como filtros absorvendo frequências indesejadas e impedindo sua propagação na estrutura. Embora usadas em diversas áreas da engenharia, estruturas periódicas ainda têm aplicação limitada na engenharia civil, especialmente para isolar vibrações causadas pelo rolamento de veículos em pavimento, em edifícios de pequeno porte. Nesse contexto, esta pesquisa desenvolveu três modelos numéricos de elementos finitos para uma estrutura de pequeno porte, que representam edificações residenciais e/ou comerciais com número de pavimentos igual ou inferior a três, em concreto armado. O primeiro modelo envolveu uma fundação de estrutura periódica tipo bloco, enquanto os dois modelos comparativos incluíram fundações periódicas tipo radier e fundações em concreto tipo bloco. O objetivo foi analisar a absorção vibracional das diferentes fundações. A fim de compara-las e observar quão benéfico é o uso de fundação periódica, no contexto do estudo. A metodologia empregada consistiu em criar os modelos de estruturas utilizando elementos finitos, aplicando condições de contorno para acoplar as camadas da fundação e a estrutura, estabelecendo continuidade. O estudo buscou respostas modais, e no domínio da frequência, resultantes da excitação na fundação, empregando o software Ansys® (2023) para todas as simulações. Os resultados revelaram que as fundações periódicas são capazes de reduzir os picos de amplitude em frequências superiores a 30 Hz, o que é benéfico para atenuar vibrações nessa faixa. Com um projeto adequado, ajustando os parâmetros geométricos e físicos dos materiais, é possível obter um isolamento vibracional eficaz para as estruturas, minimizando as vibrações provenientes das ondas do solo em edificações. Isso indica que a utilização de estruturas periódicas mostra grande potencial no que diz respeito ao isolamento de vibrações provocadas pelo tráfego em estruturas de pequeno porte.

Palavras-chave: Fundação Periódica. Elementos Finitos. Isolamento de vibrações. Análise Modal. Análise Harmônica.

ABSTRACT

LOUREIRO, Jakeline. **NUMERICAL STUDY OF THE VIBRATIONAL ABSORPTION CONSIDERING THE PERIODIC FOUNDATION EFFECT IN A SMALL STRUCTURE.** 2023. 94 p. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2023.

The growth of urban areas has led to buildings getting closer and closer to road traffic routes. This scenario exposes structures to vibrations generated by the flow of loads, causing discomfort to occupants and even structural damage, such as cracks and the risk of collapse. Although there are numerical studies on traffic vibrations, vibration isolation techniques are little explored in these studies. A promissory approach is the use of periodic structures, which act as filters absorbing unwanted frequencies and preventing their interference in the structure. Although used in several areas of engineering, periodic structures still have limited application in civil engineering, especially for isolating vibrations caused by vehicles rolling on the pavement in small-door buildings. In this context, this research developed three numerical finite element models for a small structure, which represent residential and/or commercial buildings with a number of floors equal to or less than three, in reinforced concrete. The first model included a block-type periodic structure foundation, while the two comparative models included radial-type periodic foundations and block-type concrete foundations. The objective was to analyze the vibrational absorption of different foundations. In order to compare and observe the beneficial benefits of using a periodic foundation, in the context of the study. The methodology employed consists of creating structural models using finite elements, establishing boundary conditions to couple the foundation layers and the structure, and guaranteeing guarantee. The study sought modal and frequency-domain responses resulting from foundation motivation, using the Ansys® (2023) software for all simulations. The results revealed that periodic foundations are able to reduce amplitude peaks at frequencies above 30 Hz, which is beneficial to attenuate vibrations in this range. With an adequate project, adjusting the geometric and physical parameters of the materials, it is possible to obtain an effective vibrational isolation for the structures, minimizing the vibrations from the ground waves in buildings. This indicates that the use of periodic structures shows great potential regarding the isolation of vibrations caused by traffic in small structures.

Keywords: Periodic Foundation. Finite Elements. Vibration isolation. Modal Analysis. Harmonic Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de estudo, vibrações geradas pelo tráfego Rodoviário	14
Figura 2 – Definição fundações Rasas	18
Figura 3 – Tipo de fundação conforme solo	19
Figura 4 – Fundação tipo Bloco	19
Figura 5 – Fundação tipo Sapata	20
Figura 6 – Fundação tipo Radier	21
Figura 7 – 1D - 2D 3D	22
Figura 8 – Fundação Periódica. (a) Composição periódica da fundação e propagação de vibração no eixo z. (b) Camadas de Fundação Periódica	22
Figura 9 – Interação Estrutura, fundação e Solo	29
Figura 10 – Pendulo	30
Figura 11 – Danos estruturais em Edifícios causado por vibrações induzida por vento e terremotos leves	32
Figura 12 – Trincas causadas pelo efeito de vibração de ferrovias	33
Figura 13 – Forma de propagação da (a) onda P; (b) onda S; (c) onda de Rayleigh	37
Figura 14 – Geometria, Cargas e Elementos Finitos	38
Figura 15 – Elemento de treliça com dois nós	39
Figura 16 – Elemento de treliça com dois nós e sistema de Coordenadas	42
Figura 17 – Elemento de treliça tridimensional na coordenada local	43
Figura 18 – Elemento de treliça com três nós	46
Figura 19 – Modelo Principal - 3D Ansys	58
Figura 20 – Modelo Numérico da Estrutura - Definido	59
Figura 21 – Dimensões fundação periódica tipo bloco	60
Figura 22 – Dimensões fundação de concreto tipo bloco	61
Figura 23 – Dimensões fundação periódica tipo radier	62
Figura 24 – Dimensões fundação periódica tipo radier	62
Figura 25 – Contato Tipo Bounded	64
Figura 26 – Suporte Fixo Fundação tipo Bloco	66
Figura 27 – Suporte Fixo Fundação tipo Radier	67
Figura 28 – Configuração de Análise Harmônica	68
Figura 29 – Excitação Pela Base	69
Figura 30 – Modelos Analisado por Excitação de Base	70
Figura 31 – Ponto de Resposta Análise Harmônica	71
Figura 32 – Fluxograma	72
Figura 33 – Gráfico Refinamento de Malha	74
Figura 34 – Malha Modelo Numérico Fundação Periódica tipo Radier	75
Figura 35 – Malha Modelo Numérico Fundação Periódica e de Concreto tipo Bloco	76
Figura 36 – Frequências Naturais dos Quartos primeiros modo de Vibração da Estrutura Com Fundação Periódica tipo Bloco	77
Figura 37 – Frequências Naturais dos Quartos primeiros modo de Vibração da Estrutura Com Fundação em Concreto tipo Bloco	78
Figura 38 – Frequências Naturais dos Quartos primeiros modo de Vibração da Estrutura Com Fundação Periódica tipo Radier	79
Figura 39 – Gráfico de Colunas - Frequência Natural do Modelos de Estudo	80

Figura 40 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, na base do Pilar para aceleração de 30,9mm/s ²	82
Figura 41 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, na base do Pilar para aceleração de 30,9mm/s ²	83
Figura 42 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, no topo do Pilar para aceleração de 30,9mm/s ²	83
Figura 43 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, no topo do Pilar para aceleração de 30,9mm/s ²	84
Figura 44 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, na base do Pilar para aceleração de 15,7mm/s ²	85
Figura 45 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, na base do Pilar para aceleração de 15,7mm/s ²	85
Figura 46 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, no topo do Pilar para aceleração de 15,7mm/s ²	86
Figura 47 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, no topo do Pilar para aceleração de 15,7mm/s ²	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo detalhado da Estrutura - Fundação Periódica tipo Bloco	57
Tabela 2 – Resumo detalhado da Estrutura - Fundação em Concreto tipo Bloco	57
Tabela 3 – Resumo detalhado da Estrutura - Fundação Periódica tipo Radier	58
Tabela 4 – Propriedades do Material - Aço Vergalhões	59
Tabela 5 – Propriedades do Material - Concreto e Borracha	60
Tabela 6 – Propriedades do Material - Solo	60
Tabela 7 – Propriedades do Material - Solo	60
Tabela 8 – Dimensões das Malhas	63
Tabela 9 – Aceleração mm/s ² na parede da Fundação induzidas por um ônibus e um caminhão	67
Tabela 10 – Dimensões e Qualidade das Malhas	73
Tabela 11 – Módulos de Frequência Natural para as três modelos de estruturas.	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	MOTIVAÇÃO	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	EDIFICAÇÕES DE PEQUENO PORTE	17
2.2	FUNDAÇÕES	17
2.2.1	Fundações diretas ou rasas	19
2.3	FUNDAÇÃO PERIÓDICA	21
2.4	MECÂNICA DOS SOLOS PARA ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES	24
2.4.1	Tipos e Caracterização dos Solos	25
2.4.1.1	Módulos e tensões	27
2.5	INTERAÇÃO SOLO E ESTRUTURA	29
2.6	VIBRAÇÕES MECÂNICAS	30
2.6.0.1	Estudos de vibração na atualidade	31
2.6.1	Importância do estudo da vibração	32
2.7	FONTES E EFEITOS DAS VIBRAÇÕES	33
2.8	VIBRAÇÕES NO SOLO	34
2.8.1	Tipos de Ondas	35
2.9	ELEMENTOS FINITOS	36
2.9.1	Matriz Rigidez - Unidimensional	38
2.9.2	Matriz Rigidez - Bidimensional	41
2.9.3	Matriz Rigidez - Tridimensionais	42
2.9.4	Matriz Rigidez - Global	45
2.9.5	Matriz Massa de um Elemento e Matriz massa Global	45
2.9.6	Sistemas Tridimensional de vários graus de Liberdade	47
2.9.7	Malha de Elementos Finitos	49
2.10	ANÁLISE DINÂMICA DAS ESTRUTURAS	50
2.10.1	Análise Modal	50
2.10.2	Análise Harmônica	51
2.10.3	Método da Superposição Modal	52
3	METODOLOGIA	56
3.1	SOFTWARE ANSYS	56
3.2	MODELO NUMÉRICO	56
3.2.1	Refinamento de Malha	61
3.2.2	Condições de Contorno	63
3.2.3	Análise Modal	65
3.2.4	Análise Harmônica	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	REFINAMENTO DE MALHA	73

4.2	ANÁLISE MODAL	74
4.3	ANÁLISE HARMÔNICA	79
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

O adensamento de certos urbano nos últimos anos, aproximou o trafego das edificações. Esses meios de infraestrutura de transporte, recebem cargas frequentes provenientes da passagem de veículos, esse fluxo de cargas geram esforços que são transmitidos para o solo e conseqüentemente para edificações que se encontram nas proximidades.

As cargas provenientes desse fluxo de transporte em contato com o solo, geram forças transversais, longitudinais e verticais, esses esforços se propagam pelo solo como ondas denominadas vibração. Essas ondas que se propagam no solo, eventualmente atingindo as fundações de edifícios adjacentes e fazendo com que eles vibrem. As vibrações do tráfego são causadas principalmente por veículos pesados, como ônibus e caminhões. Carros de passeio e caminhões leves raramente induzem vibrações perceptíveis nos edifícios e é difícil especificar uma relação simples quando um ônibus ou um caminhão atinge uma irregularidade na pista de rolagem. A irregularidade longitudinal na superfície da estrada, gera uma carga de impacto e uma carga oscilante devido ao subsequente "salto do eixo" do veículo. A carga de impacto gera vibrações do solo predominantes nas frequências naturais de vibração do solo, enquanto o salto do eixo gera vibrações na frequência do salto (característica do sistema de suspensão do veículo) (HUNAIDI, 2000).

As ondas de vibração do solo atingem as edificações através da ligação solo-fundação, o que ainda não é um problema completamente compreendido, pois varia com a interação das cargas rodoviárias. Além disso, a propagação das ondas depende do tipo de solo e seu amortecimento, peso e velocidade do veículo, fluxo de veículos, condição do pavimento, entre outros fatores que afetam a amplitude e frequência das vibrações geradas. Cada um desses fatores é independente e complexo de relacionar (BRITO *et al.*, 2013).

Essa vibração gerada no solo acaba afetando as edificações como um todo, seja na forma de rachaduras nas paredes, desconforto auditivo e visual para os usuários. Como também formas mais graves, gerando muito desconforto para os ocupantes, afetando a segurança do edifício, podendo causar o colapso da estrutura (FILHO; ARAÚJO, 2020). Por isso vem crescendo o número de pesquisas de como atenuar vibrações para estruturas da construção civil.

Pesquisas mostram que o uso de estruturas periódicas pode isolar as vibrações de uma estrutura. Segundo Zhao *et al.* (2021), as diferentes bandas de gaps criadas em uma fundação periódica de diferentes camadas, é capaz de absorver/dissipar a energia transmitida pelo solo,

provenientes de terremotos e outras vibrações. A combinação dos polímeros, com concreto exibem características únicas de gap de banda, as ondas elásticas que podem ser filtradas e não podem continuar a se propagar através da estrutura quando a frequência predominante cai dentro dos gaps de banda de frequência.

O intervalo de banda de frequência, ou seja, uma região de frequência onde as ondas e vibrações são inibidas ou atenuadas ao longo de seu caminho de propagação, a atenuação da vibração é possível se a frequência de uma excitação estiver dentro das zonas de atenuação (CHENG; SHI, 2013).

A ideia é que essas estruturas periódicas funcionem como um filtro, criando gaps de bandas de frequência, absorvendo as frequências dentro da zona de atenuação, não repassando essa vibração para o restante da estrutura. A fundação periódica pode não só suportar a superestrutura, mas também atenuar as ondas de vibração devido à ausência de intervalos de bandas de frequência (ZHAO *et al.*, 2021).

Vibrações geram desconforto e irritação para as pessoas que residem em prédios ou construções residenciais, além de trazer danos estruturais e prejuízos financeiros. Neste contexto, o presente trabalho é motivado pela necessidade de estudos que visem o isolamento de vibrações em estruturas devido ao tráfego rodoviário. Como a maioria dos problemas de vibração, as vibrações do tráfego podem ser caracterizadas por um cenário fonte-caminho-receptor conforme apresentado na figura 1 .

Figura 1 – Modelo de estudo, vibrações geradas pelo tráfego Rodoviário



Fonte: Autoria Propriá (2023).

Essa pesquisa consiste na análise do isolamento vibracional de uma fundação periódica em blocos, para a análise da eficiência da estrutura utilizou como modelo comparativo uma fundação periódica tipo radier, pois já vem se pesquisando fundações desse modelo para isolamento vibracional de sismos, o nosso modelo de estudo também foi comparado com fundação tipo

bloco em concreto, a fundação convencional que é utilizada na maioria dos edifícios de pequeno porte no Brasil. Saliento que esse trabalho não é sobre dimensionamento de estruturas, e sim para analisar o quanto estruturas periódicas podem ser benéficas no isolamento de vibrações, portanto foi considerado uma estrutura genérica em que a mesma pelo menos atendesse as dimensões mínimas da NBR 6118, já que nossa estrutura é por sua maior parte composta de concreto armado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Objetivo geral dessa pesquisa consiste em realizar uma modelagem numérica em elementos finitos de uma estrutura de pequeno porte em concreto armado (edificação residencial e/ou comercial), com fundação de estrutura periódica, afim de analisar a absorção vibracional da fundação, no regime linear.

1.1.2 Objetivos específicos

Objetivo específico desse trabalho conta:

i) Desenvolver três modelos de estudo utilizando o método de elementos finitos, definindo as características do solo, da estrutura e da carga proveniente dos esforços de tráfego (vibração). O primeiro modelo com fundação periódica em bloco, segundo modelo fundação de concreto em bloco, terceiro modelo fundação periódica tipo radier.

ii) Definir as condições de contorno para o acoplamento entre as camadas da fundação e entre a fundação e a estrutura.

iii) Estabelecer critérios de continuidade para o modelo em elementos finitos entre a fundação e a estrutura para a obtenção de respostas modais e no domínio da frequência, que serão usadas para avaliar o comportamento da estrutura, ao ser excitada por uma força externa de tráfego.

1.2 MOTIVAÇÃO

O trabalho proposto surgiu da necessidade de pesquisas voltadas ao isolamento de vibrações em pequenas estruturas, resultado dos esforços gerados por forças externas como o tráfego rodoviário. Pois essas vibrações, além de causarem danos estruturais e perdas econômicas, também podem causar desconforto e irritação aos ocupantes de edificações residenciais ou estruturas localizadas próximas a esses fluxos de carga da infraestrutura de tráfego.

O Brasil carece atualmente de pesquisas sobre o tema proposto, e a expansão das cidades e o fluxo de tráfego rodoviário, aumentando as cargas nos pavimentos, e conseqüentemente no solo, aliada ao avanço das construções próximas a essas infraestruturas, agravando os problemas das estruturas e de seus ocupantes.

Abordando essas questões, o presente estudo trará uma importante contribuição para o conhecimento do isolamento de vibração de pequenas estruturas, para vibrações forçadas oriundas do tráfego rodoviário na faixa de 1-50Hz, essas vibrações que trazem problemas nas estruturas, como trincas, deslocamento de revestimento de paredes entre outros, além do desconforto dos ocupantes das edificações.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos:

- O primeiro capítulo apresenta a introdução que contém uma descrição e uma visão geral do estudo e contextualização do assunto a ser estudado.
- O segundo capítulo apresenta um referencial teórico que contém teorias e conceitos relacionados ao assunto deste trabalho, presentes na literatura.
- O terceiro capítulo apresenta metodologia numérica.
- O quarto capítulo trata dos resultados.
- O capítulo cinco contém as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica sobre tópicos que envolvem o assunto tratado neste trabalho.

2.1 EDIFICAÇÕES DE PEQUENO PORTE

Edifícios de pequeno porte são definidos pelo limite de sua estrutura, sendo a maioria deles residências, escritórios, pequenos comércios, entre outros.

De acordo com a Prática Recomendada IBRACON, estruturas de pequeno porte, são edificações que possuem até 4 pavimentos, sem protensão, submetidas a sobrecargas inferiores a 3 kN/m^2 , com pé direito de pilares até 4 m e vigas com vãos que não ultrapasse 6 m ((IBRACON), 2001).

Segundo Costella *et al.* (2014) construções de pequeno porte são obra com até dois pavimentos tendo área máxima de 250 m^2 , construções de médio porte edifícios com até quatro pavimentos, com área máxima de 2.000 m^2 , e edifícios com mais cinco pavimentos construções de grande porte.

Mas ainda não existe uma definição universal para edifícios de pequeno porte, pois a mesma pode variar de acordo com o local que se encontra. De modo geral, tem-se um consenso que edifícios de pequeno porte são considerados aqueles com menor número de andares e menor área construída em comparação com edifícios maiores, como prédios residenciais ou comerciais de vários andares, e de grandes áreas.

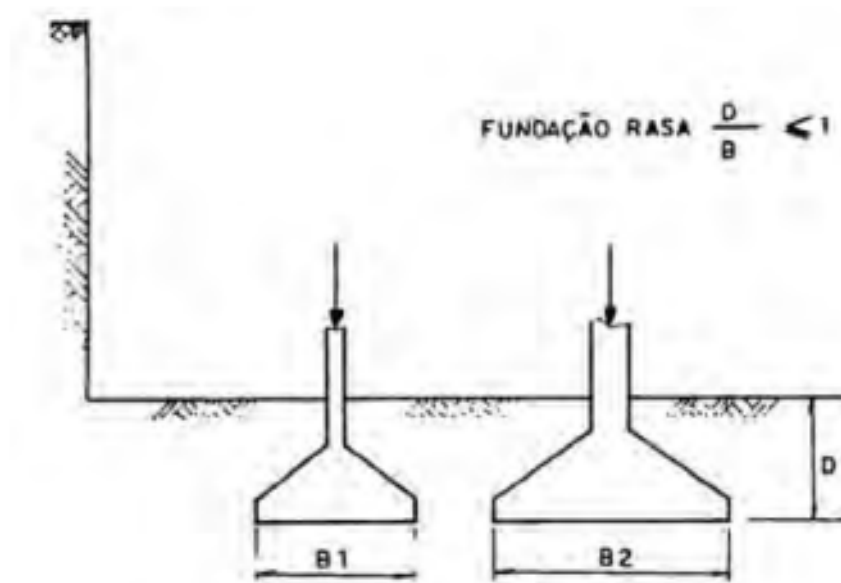
2.2 FUNDAÇÕES

As fundações são estruturas construídas para transmitir as cargas de uma edificação para o solo. Existem vários tipos de fundações, e elas estão divididas em duas categorias: fundações rasas e fundações profundas.

As fundações rasas ou diretas ganharam esse nome pois se apoiam sobre o solo a uma pequena profundidade. A distância de apoio, é contada a partir do solo de apoio em relação ao solo em que se encontra o primeiro pavimento do edifício, seja ele térreo ou pavimento subterrâneo Figura 2. As fundações rasas se dividem em blocos, sapatas e radier (FALCONI *et*

al., 2019).

Figura 2 – Definição fundações Rasas



Fonte: Falconi et al. (2019)

As Fundações profundas se dividem em duas categorias: Estacas de deslocamento e Estacas escavadas. As estacas de deslocamento são colocadas no terreno sem remoção de solo. Se enquadram como estacas de deslocamento: estacas pré-moldadas de concreto armado, estacas metálicas, estacas de madeira, estacas Franki, estacas apiloadas de concreto, estacas de concreto fundido no terreno dentro de um tubo de revestimento de aço cravado com ponta fechada e estaca Omega (FALCONI et al., 2019).

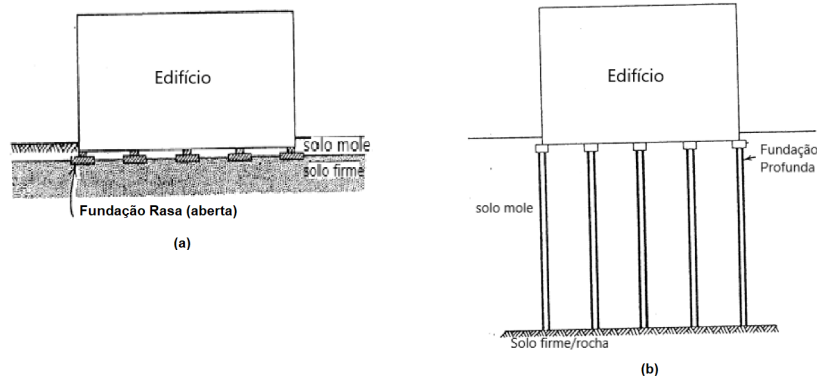
As estacas escavas são instaladas escavando um buraco na terra executadas in loco com ou sem revestimento, com ou sem utilização de fluido estabilizante. Se enquadram como estacas escavadas: estacas tipo broca, executadas manual ou mecanicamente, estacas do tipo Strauss, as barretes, os estacões, as hélices contínuas, as estacas injetadas, etc (FALCONI et al., 2019).

A escolha do tipo de fundação a ser utilizada dependerá do tipo de solo, projeto da edificação, carregamento do edifício, a escolha da fundação deve atender também os critérios de segurança, o aspecto econômico e de mercado, disponibilidade de equipamentos e materiais (FALCONI et al., 2019).

Mas de modo geral, o primeiro passo é determinar o tipo de solo para assim definir se a fundação será rasa ou profunda. Segundo Lambe e Whitman (1969) quando o solo firme está próximo à superfície, um meio viável de transferir as cargas concentradas das paredes ou colunas de um edifício para o solo é por meio de fundações rasas abertas (Figura 3 - a). E quando o solo

firme esta não está próximo à superfície do solo em que recebe a edificação, um meio comum de transferir os esforços da estrutura para o solos, é utilizando fundação profunda (Figura 3 - b).

Figura 3 – Tipo de Fundação conforme solo: a) Fundação Rasa; b) Fundação Profunda

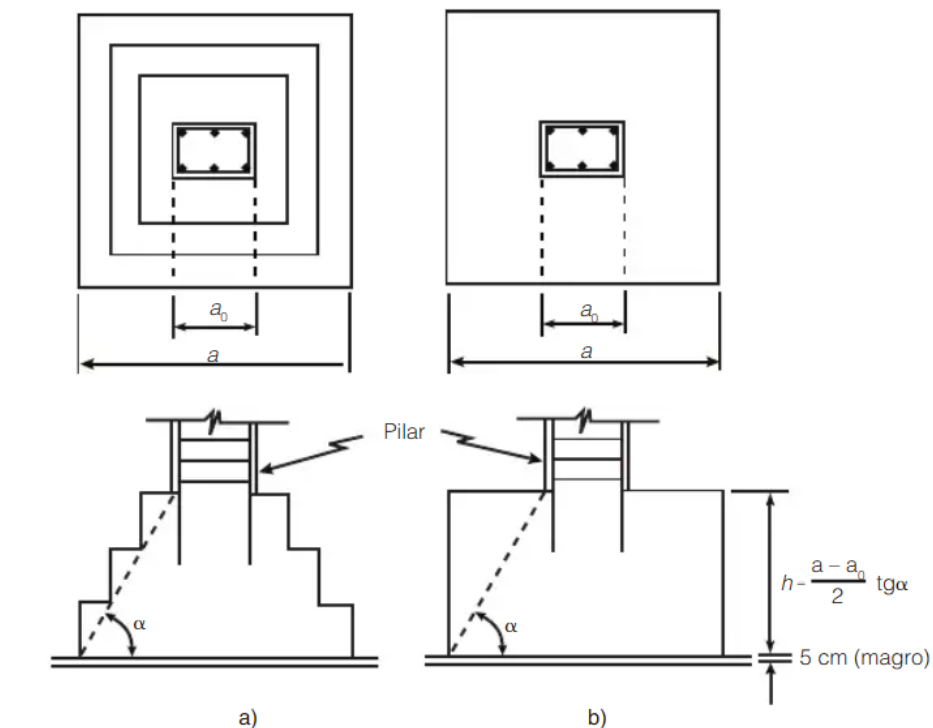


Fonte: Adaptado Lambe e Whitman (1969).

2.2.1 Fundações diretas ou rasas

Os blocos são elementos de grande rigidez executados com concreto simples ou ciclópico (Figura 4), são elementos que não possuem armaduras, dimensionados de modo que as tensões de tração sejam absorvidas pelo próprio concreto (ALONSO, 2010).

Figura 4 – Fundação tipo Bloco

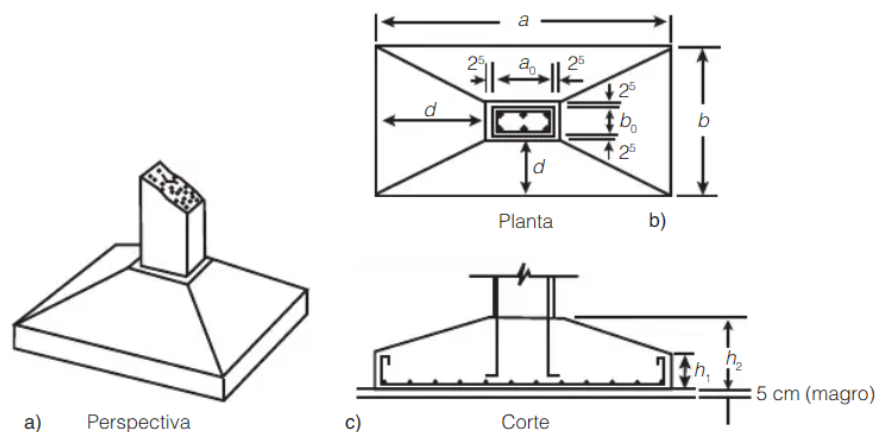


Fonte: Alonso (2010)

Sapatas são elementos de fundação executados em concreto armado (Figura 5), de altura reduzida em relação às dimensões da base e que se caracterizam principalmente por trabalhar a flexão (ALONSO, 2010). A fundação do tipo sapata, possui variações, sendo elas:

- Sapata isolada: sapata individual usada para suportar um único pilar;
- Sapata corrida: única sapata corrida que suporta diversos pilares;
- Sapata associada: junção de sapatas isoladas, quando dois ou mais pilares encontram-se muito próximos e criasse apenas uma sapata para receber os esforços.
- Sapata flutuante: sapata construída acima do nível do solo, usada em solos com alta umidade ou água subterrânea.
- Sapata de pressão: sapata construída com uma câmara de pressão para evitar a entrada de água no solo;
- Sapata de divisa: sapata construída nas divisas de lotes, recebendo as cargas dos pilares com excentricidade;
- Sapata com viga de equilíbrio: sapata construída com uma viga de equilíbrio para distribuir a carga de forma mais equilibrada.

Figura 5 – Fundação tipo Sapata

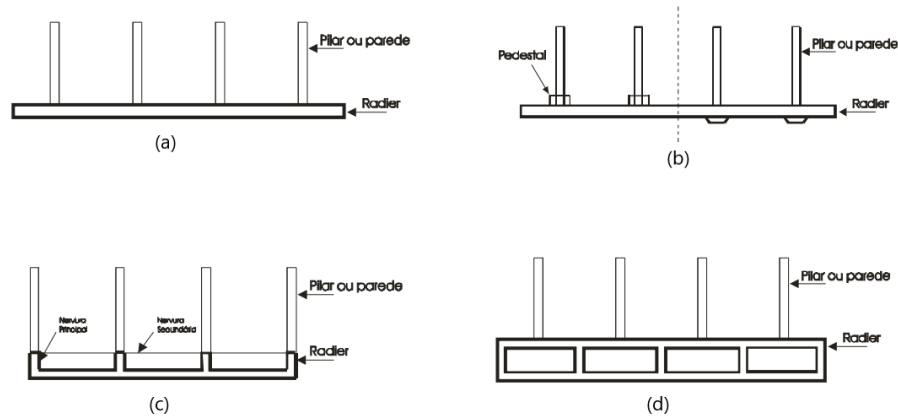


Fonte: Alonso (2010)

O radier é uma fundação superficial, construída na forma de laje em concreto armado ou protendido, que recebe todas as cargas através de pilares ou alvenarias da edificação, distribuindo-as de forma uniforme ao solo (DÓRIA, 2007). Esse tipo de fundação superficial se divide em quatro variações: radier liso, radier com pedestais ou cogumelos, radier nervurado e radier em Caixaão (Figura 6).

Segundo Falconi *et al.* (2019) a utilização de fundações diretas ou rasas se torna viável quando a 1m abaixo da cota de implantação do último nível do edifício, encontra-se o terreno com resistência e deformabilidade compatível com a estrutura, ou seja, que a fundação rasa (bloco,

Figura 6 – Fundação tipo Radier - (a)Radier liso; (b)Radier com pedestais ou cogumelos; (c)Radier Nervurado; (d)Radier em Caixaão



Fonte: Dória (2007)

sapata ou radier) seja executada até 1m de profundidade em relação ao primeiro pavimento, seja ele subsolo ou pavimento térreo.

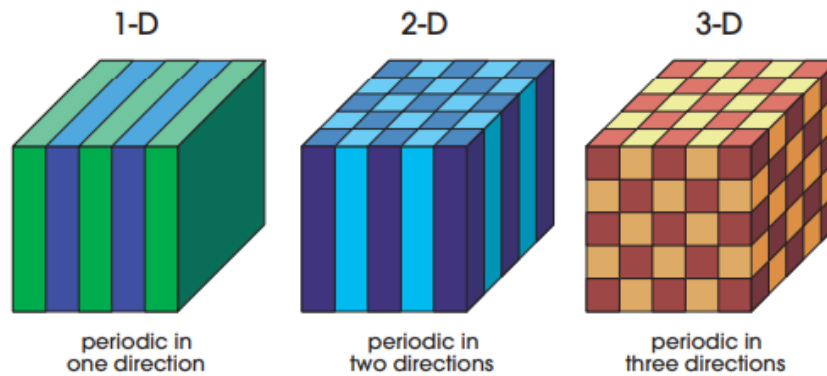
2.3 FUNDAÇÃO PERIÓDICA

O conceito de estrutura periódica foi proposto na década de 1980, e muitos pesquisadores usaram essas estruturas para controlar o fluxo de luz no campo da óptica, e esses materiais também são chamados de cristais fotônicos (HARTUNG *et al.*, 2010). Este conceito foi e também está sendo aplicado ao campo da acústica usando o princípio de Floquet para resolver a equação de onda diretamente, Mead (MEAD, 1996) obteve as curvas de propagação e constantes de atenuação relacionadas a vigas e placas periódicas quase unidimensionais e conchas cilíndricas. Sistema de estruturas periódicas podem ser classificadas, em periódico em uma direção 1-D, periódico em duas direções 2-D e periódico em três direções 3-D, conforme mostrado na Figura 7, exemplos simples de cristais fotônicos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. As diferentes cores representam materiais com diferentes constantes dielétricas. A característica definidora de um cristal fotônico é a periodicidade do material dielétrico ao longo de um ou mais eixos (JOANNOPOULOS *et al.*, 2007).

Na figura 8 podemos observar a formulação básica da estrutura periódica composta por camadas, com estrutura periódica 1-D, a mesma a ser utilizada neste trabalho.

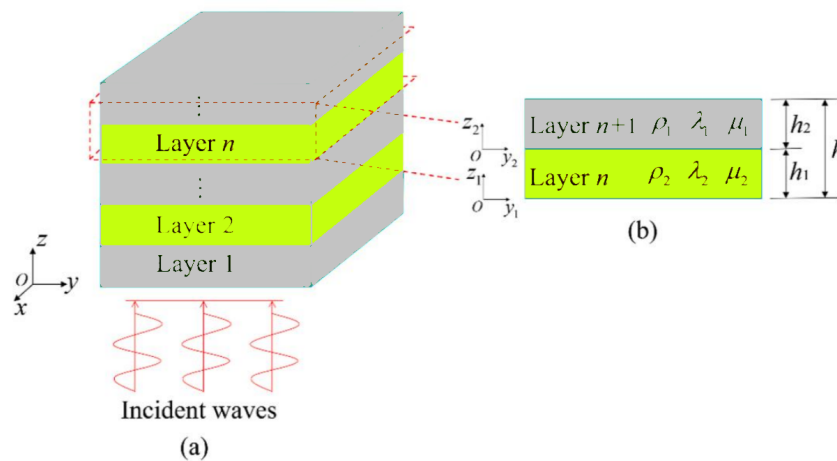
Materiais periódicos chamados cristais fonônicos exibem uma habilidade única de manipular a propagação de ondas elásticas. Isto é conseguido deliberadamente estruturando e

Figura 7 – Classificação estruturas Periódicas



Fonte: Joannopoulos *et al.* (2007)

Figura 8 – Fundação Periódica. (a) Composição periódica da fundação e propagação de vibração no eixo z. (b) Camadas de Fundação Periódica



Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2021)

organizando a fase ou geometria dos materiais para tirar vantagem das interações onda-material, incluindo modos de ondas estacionárias resultantes da superposição de ondas incidentes e refletidas e ressonâncias locais em sistemas subestruturais (HARTUNG *et al.*, 2010).

A existência de intervalos de banda de frequência é bem prevista pelo teorema de Floquet Bloch, que pode ser usado para evitar que qualquer tipo de onda se propague dentro de materiais periódicos (ELFORDA *et al.*, 2011). Portanto, a propriedade única de intervalos de banda de frequência resultou em inúmeras aplicações potenciais em engenharia, estruturas periódicas podem auxiliar no isolamento térmico (YANG *et al.*, 1996), redução de ruído (HU *et al.*, 2019) e isolamento de vibração (SIGALAS *et al.*, 2005).

A pesquisa de Xiong *et al.* (2012) mostra que as fundações periódicas compostas, podem não apenas bloquear ondas sísmicas horizontais, mas também ondas sísmicas verticais quando as frequências das ondas caem nos intervalos de banda/zona de atenuação das fundações periódicas compostas, mostrou o desempenho antissísmicos das fundações periódicas é melhor

do que o das fundações de isolamento tradicionais e das fundações de concreto comuns. A resposta dinâmica da estrutura em uma fundação periódica pode ser bastante reduzida quando as frequências das ondas de entrada caem na zona de atenuação (intervalo de banda de frequência) (XIONG *et al.*, 2012).

O trabalho de Liu *et al.* (2021) investigou o mecanismo de geração das zonas de atenuação combinadas variando a configuração das fundações periódicas em camadas combinadas, e concluiu que a geração das zonas de atenuação combinadas de fundações periódicas estratificadas combinadas resulta da contribuição das zonas de atenuação de ambas as fundações periódicas estratificadas tradicionais. Que a primeira zona de atenuação combinada de uma fundação periódica em camadas combinada pode ser simplesmente obtida pela união das primeiras zonas de atenuação das fundações periódicas em camadas tradicionais com precisão aceitável no campo da engenharia. E que as zonas de atenuação combinadas de fundações periódicas em camadas combinadas têm frequência inicial comparativamente baixa e grande largura de banda, o que é uma vantagem no campo do isolamento sísmico que as fundações periódicas em camadas tradicionais não possuem (LIU *et al.*, 2021).

O estudo de Huang *et al.* (2021) investigou o efeito do amortecimento do material no desempenho de fundações periódicas em camadas. Foram investigados tanto os mecanismos de atenuação de dispersão (relacionado à periodicidade da fundação periódica) quanto de dissipação (relacionado ao amortecimento do material da fundação periódica), bem como sua interação. Os resultados mostram que, graças ao efeito de filtragem da fundação periódica em camadas, as respostas sísmicas da estrutura superior são significativamente atenuadas dentro da zona de atenuação de frequência esperada. Além disso, a inclusão do amortecimento do material leva a uma redução adicional da resposta sísmica da estrutura superior, dentro das bandas de passagem. No geral, o desempenho sísmico da estrutura superior sob movimentos do solo em diferentes condições do local é melhorado através do emprego de uma fundação periódica em camadas amortecidas com mais de uma célula unitária (HUANG *et al.*, 2021).

O efeito de atenuação é gerado devido à reflexão interna das ondas causada pelas variações de impedância (diferença de propriedades do material ou descontinuidades geométricas), as frequências dentro da banda de atenuação, as ondas refletidas agem para cancelar a onda incidente, resultando em uma onda transmitida com atenuação significativa (SANTOS, 2018).

2.4 MECÂNICA DOS SOLOS PARA ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES

A mecânica dos solos é a aplicação das leis da mecânica e da hidráulica a problemas de engenharia que lidam com sedimentos e outras acumulações não consolidadas de partículas sólidas produzidas pela desintegração mecânica e química das rochas, independentemente de conterem ou não uma mistura de constituintes orgânicos, sendo essa matéria para a engenharia chamada de solo (TERZAGHI, 1943).

Segundo Das (2008) a mecânica dos solos é o ramo da engenharia que lida com as propriedades de engenharia dos solos e seu comportamento sob tensão.

Os solos são agregados de partículas minerais e, juntamente com o ar e/ou a água nos espaços vazios, formam sistemas trifásicos. Uma grande porção da superfície terrestre é coberta por solos, e eles são amplamente utilizados como materiais de construção e fundação (DAS, 2008).

Na engenharia civil, o solo desempenha um papel muito importante, pois é a camada do subsolo que suporta as fundações de edifícios, pontes, rodovias, tuneis, muros, torres, canais, represas e entre outras estruturas, que devem ser fundadas no solo. Sendo o solo um material frequentemente utilizado por engenheiros civis profissionais, seja como base para estruturas portantes e pontes, materiais de construção ou no projeto de escavações subterrâneas e vedações (LAMBE; WHITMAN, 1969).

O que faz com que a disciplina de mecânica dos solos seja tão importante para a engenharia, pois os profissionais dessa área além de lidar com as diferentes aplicações do solo, eles também tiveram que lidar com diferentes tipos de solo (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Os solos são muito distintos entre si e respondem de maneira muito diferente, por isto, há anos engenheiros e pesquisadores, vem tentando entender e identificar as características e comportamentos dos solos. O engenheiro civil Karl Terzaghi, com grande experiência em formação científica, deu início a ciência da engenharia chamada Mecânica dos Solos, com o seu estudo sobre o papel das pressões na água nas tensões nos solos, ele propôs uma solução matemática para a evolução dos recalques das argilas com o tempo após o carregamento, sendo esse um dos marcos iniciais reconhecido da Mecânica dos Solos (FALCONI *et al.*, 2019).

A mecânica dos solos inclui: teorias do comportamento dos solos sob estresse (tensões), com base em pressupostos radicalmente simplificadores, investigação da propriedades físicas de solos reais, e a aplicação de nossa teoria e conhecimento empírico do assunto para problemas

práticos (TERZAGHI, 1943).

A mecânica dos solos é o conhecimento básico das propriedades físicas e mecânicas dos solos, como compressibilidade, resistência à carga e capacidade de carga. Isso permite que os engenheiros determinem o tipo e a profundidade da fundação necessária para cada projeto de construção/fundação. Além disso, entender a estabilidade de encostas e deslizamentos é essencial para prevenir desastres naturais e garantir a segurança. A mecânica dos solos é essencial para a construção de estruturas seguras e duráveis.

O conhecimento sobre solos não está limitado apenas ao que a Mecânica dos Solos pode explicar, para entender o comportamento desse material também é preciso da química e da física coloidal, seus conhecimentos são importantes pois podem demonstrar vários aspectos do comportamento do solo e sendo então parte integrante da mecânica dos solos, enquanto o conhecimento da geologia é fundamental para o tratamento adequado das fundações. A engenharia de fundações é uma arte, aperfeiçoamento pela experiência, devida observação e interpretação do comportamento da fundação, e isso não se faz sem se atentar às propriedades do solo. Por outro lado, o desenvolvimento de todas as técnicas de projeto e a execução de fundações dependem do entendimento dos mecanismos de comportamento do solo (FALCONI *et al.*, 2019).

2.4.1 Tipos e Caracterização dos Solos

Podemos classificar o solo em três tipos com base no seu método de formação, ou seja, na estrutura de suas partículas, sendo eles o solo sedimentar, residual ou de preenchimento. Em solos sedimentares, as partículas individuais são produzidas/criadas em um local, transportadas e depositadas em outro local. Um solo residual é aquele formado no local pelo intemperismo da rocha, com pouco ou nenhum movimento das partículas individuais do solo. O solo de preenchimento é um depósito de material/terra feito pelo homem (LAMBE; WHITMAN, 1969).

A formação de solos sedimentares pode ser apresentada considerando a formação de sedimentos, transporte de sedimentos e deposição de sedimentos, respectivamente. A maneira mais importante de formação de sedimentos é pelo intemperismo físico e químico das rochas na superfície da terra. Geralmente as partículas do tamanho de silte, areia e cascalho são formadas pelo intemperismo físico das rochas e as partículas do tamanho da argila são formadas pelo intemperismo químico das rochas. A formação de partículas de argila a partir de rochas pode ocorrer pelo acúmulo de partículas minerais a partir de componentes em solução ou pela

decomposição química de outros minerais (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Solos sedimentares são encontrados em áreas onde o material sedimentar é erodido, transportado e depositado, em rios, lagos e oceanos. Este solo é geralmente mais fértil do que outros tipos porque contém uma variedade de nutrientes. Alguns dos tipos mais comuns de solos sedimentares incluem: Solo arenoso: constituído principalmente por grãos de areia, é permeável e não retém umidade bem. Solo siltoso: composto principalmente por partículas de silte, é menos denso e menos permeável do que o solo argiloso. Solo argiloso: composto principalmente por partículas finas de argila, é denso e retém umidade com facilidade. Solo arenito: composto por grãos de areia aglomerados, é permeável e pode ser encontrado em áreas costeiras.

O solo residual é resultado de quando o material gerado pelo intemperismo das rochas não é transportado como sedimentos, mas se acumulam no local (LAMBE; WHITMAN, 1969). O solo residual é caracterizado por sua textura, cor e composição química distintas da rocha mãe. Ele pode ser encontrado em vários ambientes, incluindo montanhas, encostas e topos de colinas.

O solo de preenchimento e o processo de formação por depósito. Um preenchimento é na verdade um depósito "sedimentar" para o qual o homem realizou todos os processos de formação. O solo é transportado por veículo terrestre (como caminhão, carregadeira ou trator) e é depositado por despejo (LAMBE; WHITMAN, 1969). Geralmente formado devido a construções, terraplanagem ou outros projetos de engenharia, ele pode ser composto por uma ampla variedade de materiais, incluindo argila, areia, cascalho, entre outros.

A classificação dos solos é feita com base na composição, textura e outras propriedades físicas e mecânicas do solo.

Para que se possa identificar todas essas características, existem diversos métodos de investigações: Inspeção visual; Relatórios geológicos e mapas; Registros de construções passadas; Exploração; Geofísico; Elétrico; Amostragem e teste de poços; Teste de campo testes de penetração; Testes de pressão dos poros do lençol freático; Testes de bombeamento; Testes de carga; Testes de compactação; Ensaio de palheta; entre outros (LAMBE; WHITMAN, 1969).

A caracterização do solo é de grande importância para a engenharia, pois permite que se avalie suas propriedades mecânicas, incluindo sua resistência à compressão e sua capacidade de suportar cargas, sendo essas informações primordiais para que engenheiros possam definir as fundações a serem utilizadas em suas estruturas.

É necessário proceder-se à identificação e à classificação das diversas camadas componentes do substrato a ser analisado, assim como, à avaliação das suas propriedades técnicas. A

obtenção de amostras ou a utilização de processos para a identificação e classificação dos solos exige a execução de ensaios em campo. A determinação das propriedades físicas e mecânicas, em princípio, podem ser feita através de ensaios de laboratório quanto de ensaios de campo (FALCONI *et al.*, 2019).

Segundo Falconi *et al.* (2019) os ensaios de campo existentes que mais se destacam são: “Standard Penetration Test”- SPT; “Standard Penetration Test” complementado com medidas de torque - SPT-T; O ensaio de penetração de cone - CPT; O ensaio de penetração do cone com medida das pressões neutras, ou piezocone - CPT-U; O ensaio de palheta - “Vane Test”; Os pressiômetros (de Ménard e auto-perfurantes); O dilatômetro de Marchetti; Os ensaios de carregamento de placa – provas de carga; Os ensaios geofísicos, em particular o ensaio de Cross-Hole; Sendo o mais utilizado no Brasil o ensaio tipo SPT.

2.4.1.1 Módulos e tensões

Muitos materiais de engenharia, como metais, concreto e madeira, exibem comportamento linear tensão-deformação, pelo menos até um certo nível de tensão. Isso significa que as deformações serão duas vezes maiores se as tensões forem duas vezes maiores. Essa propriedade é descrita pela lei de Hooke, e os materiais são chamados de elásticos lineares. Porém os solos, não satisfazem esta lei. Sendo assim os solos são não lineares e não elásticos. Além disso, os solos muitas vezes não são isotrópicos, porque durante a formação de depósitos de solo pode-se que haja uma diferença entre a direção de deposição (a direção vertical) e as direções horizontais (VERRUIJT, 2006).

Por exemplo o comportamento do solo a compressão, ele se torna-se gradualmente mais rígido. Solos arenosos sob uma certa tensão de compressão ganha uma rigidez e resistência cada vez maiores. Isso é causado principalmente pelo aumento das forças entre as partículas individuais, o que confere à estrutura das partículas uma resistência crescente. Esta propriedade é utilizada no dia a dia pelo acondicionamento do café e outros materiais granulados por meio de envelope plástico, e pela aplicação de vácuo no interior da embalagem. A embalagem fica muito dura quando o ar é evacuado dela. Na engenharia civil, a propriedade não linear é utilizada com grande vantagem na fundação de estacas para um edifício em solo muito mole, sustentado por uma camada de areia. Na areia abaixo de um depósito espesso de argila macia, o nível de tensão é alto, devido ao peso da argila. Isso torna a areia muito dura e forte, e é possível aplicar grandes forças compressivas às estacas, desde que sejam longas o suficiente para penetrar bem na areia

(VERRUIJT, 2006).

Porem a tensões de cisalhamento, os solos tornam-se gradativamente mais moles, e se as tensões atingirem um determinado nível, em relação às tensões normais, é até possível que ocorra a ruptura da massa de solo. Isto significa que a inclinação de um monte de areia, por exemplo de uma barragem, não pode ser superior a cerca de 30 ou 40 graus. A razão para isso é que as partículas deslizariam umas sobre as outras (VERRUIJT, 2006).

comportamento nesses dois modos de deformação é completamente diferente. As deformações por cisalhamento são geralmente muito maiores do que as deformações em compressão. Além disso, na compressão o material torna-se gradualmente mais rígido, enquanto no cisalhamento torna-se gradualmente mais macio (VERRUIJT, 2006).

Outro fenômeno característico de solos granulares é a dilatação descoberto por Reynolds, em 1885. A dilatação é o aumento de volume que pode ocorrer durante o cisalhamento. Na maioria dos materiais de engenharia (como metais), uma mudança de volume é produzida por uma tensão geral (isotrópica), e deformações de cisalhamento são produzidas por tensões de cisalhamento, e esses dois tipos de resposta são independentes. O comportamento mecânico dos solos é mais complicado (VERRUIJT, 2006).

A dilatação pode ter alguns resultados inesperados, especialmente quando o solo está saturado de água. Uma areia densamente compactada carregada por tensões de cisalhamento só pode sustentar essas tensões de cisalhamento por uma deformação de cisalhamento. Por dilatação isso só pode ocorrer se for acompanhado de um aumento de volume, ou seja, de um aumento da porosidade. Em um solo saturado, isso significa que a água deve ser atraída para preencher o espaço adicional dos poros. Esse fenômeno pode ser observado na praia, ao caminhar na areia na área alagada pelas ondas. O solo ao redor do pé fica seco pela sucção do solo próximo e abaixo do pé, que deve suportar a carga. Isso pode ser interpretado como um efeito positivo, mas deve-se notar que o efeito desaparece em momentos posteriores, quando a água flui para os poros (VERRUIJT, 2006).

O estudo da densidade de solos granulares pode ser de grande importância para o comportamento mecânico, principalmente quando saturados com água, e principalmente para efeitos de curto prazo. A areia densamente compactada terá tendência a se expandir (dilatância) e a areia fracamente compactada terá tendência a se contrair (contratação). Em deformações contínuas, tanto a areia densa quanto a areia solta tenderão a um estado de densidade média, às vezes denotado como densidade crítica. No entanto, este não é um valor exclusivamente definido

da densidade, pois também depende da tensão isotrópica. Em altas tensões, a densidade crítica é um pouco menor do que em pequenas tensões (VERRUIJT, 2006). Por isso faz necessário a investigação de terrenos (solos) aonde cada estrutura será implantada, o comportamento de cada solo e sua caracterização varia de acordo com diversos aspectos (formação, composição, saturação, entre outros).

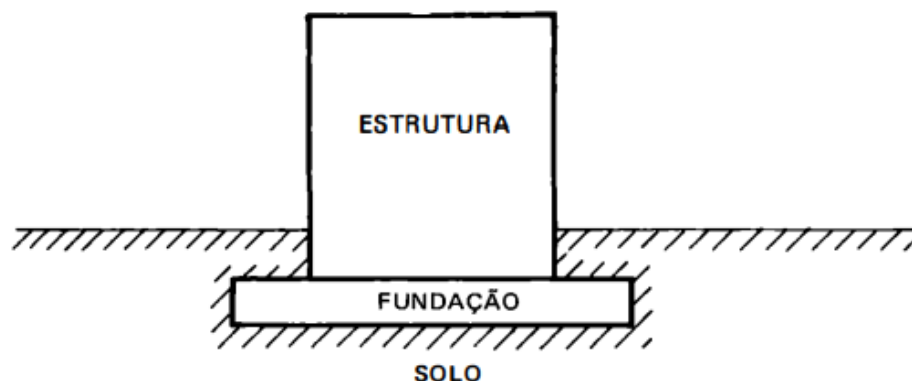
A razão entre a deformação lateral e axial, e um parâmetro muito importante na definição das características de compressibilidade dos solos e rochas. Assim, pela Teoria da Elasticidade, demonstra-se que um material com $\nu = 0,5$ não sofre variação de volume (muda de forma através da diminuição da altura e "embarrigamento" lateral). No caso de $\nu = 0$, ocorre variação de volume por diminuição de altura sem haver, todavia, deformação lateral. São dois casos extremos. As situações intermediárias ($0 < \nu < 0,5$), correspondem a materiais que sofrem simultaneamente "embarrigamento" e variação de volume. Valores de coeficiente de Poisson para solos arenosos 0,15 - 0,25 Argila com pouca 0,30 - 0,35 areia e silte Argila 0,35 - 0,40 (TRICHÊS, 1985).

2.5 INTERAÇÃO SOLO E ESTRUTURA

Recordemos que o objetivo da Geotécnica (assim entendendo-se os estudos afetos à Geologia Aplicada, Hidrologia, Mecânica dos Solos e Mecânica das Rochas) é exatamente o de determinar, tanto quanto possível sob fundamentação científica, a interação terreno-fundação-estrutura (Fig. 1 -1c), com o fim de prever e adotar medidas que evitem recalques prejudiciais ou ruptura do terreno, com o conseqüente colapso da obra. Em outras palavras, o que se procura é alcançar a maior estabilidade e o menor custo da obra, além da proteção de obras vizinhas, quando for o caso. É a consideração do binômio técnica-economia (CAPUTO, 1988).

Figura 9

Figura 9 – Interação Estrutura, fundação e Solo



Fonte: Caputo (1988).

2.6 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Vibração é definida como um movimento periódico, isto é, uma oscilação de uma partícula, um sistema de partículas ou um corpo rígido em torno de uma posição de equilíbrio (SILVA, 2009).

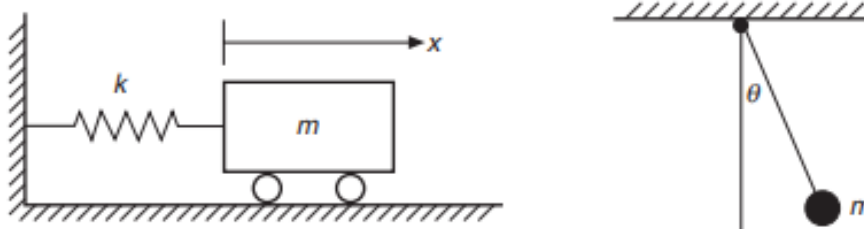
Segundo Rao (2008), qualquer movimento que se repita dentro de um intervalo de tempo pode ser chamado de vibração ou oscilação, como o balancear de um pendulo, é um exemplo de vibração. A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e forças associados a eles (RAO, 2008).

De acordo He e Fu (2001) a vibração é um movimento que se repete, essa repetição pode ou não se perpetuar. A repetição também não precisa ser uma duplicação literal. Alguma vibração pode se repetir em um sentido estatístico. Ao contrário de uma percepção geral, os elementos vitais para a vibração não são a presença de componentes inerciais e elásticos como massa e mola.

Uma vez que a vibração pode ser considerada como a transferência entre a energia cinética e a energia potencial, um sistema vibratório deve incluir um meio de armazenar (e liberar) ambas as energias. O primeiro é muitas vezes feito por uma massa e o último por uma mola. A massa é o componente responsável pela energia cinética, enquanto a mola é o componente da energia potencial.

Um pêndulo também é um exemplo típico de um sistema vibratório, mostrado na Figura 10. Este sistema não possui um componente tipo mola para energia potencial. De fato, a massa desempenha um papel duplo tanto para a energia cinética quanto para a energia potencial. Este é um exemplo para contestar a percepção de que um sistema vibratório deve ter componentes de massa e rigidez (HE; FU, 2001).

Figura 10 – Pendulo



Fonte: He e Fu (2001)

Segundo Inman (2007) a vibração é a subdisciplina da dinâmica que lida com o movi-

mento repetitivo. Sendo um fenômeno presente no nosso cotidiano seja em elementos mecânicos, estruturais ou em sistemas biológicos sendo a fonte da comunicação o ouvido vibra para ouvir e a língua e as cordas vocais vibram para falar. Instrumentos musicais vibram para emitir som, e nesses casos essas vibrações são desejadas.

Por outro lado, na maioria dos sistemas de estruturas mecânicas, a vibração é indesejada e até mesmo destrutiva. Por exemplo, a vibração em uma estrutura de aeronave causa fadiga e pode eventualmente levar à falha. A vibração induzida pelo vento e a vibração induzida por terremotos leves podem causar rachaduras ou danos mais sérios à estrutura da construção civil, como edifícios, pontes, entre outros, apresentado na Figura 11, (INMAN, 2007).

Por isso a importância de se estudar vibração e como minimizar esse fenômeno em alguns casos. Automóveis, trens e até algumas bicicletas, já possuem dispositivos para reduzir a vibração induzida pelo movimento e transmitida ao motorista (INMAN, 2007).

2.6.0.1 Estudos de vibração na atualidade

Há anos pesquisadores e estudiosos vem buscando conhecimento sobre vibrações não lineares, pois a maioria de suas aplicações abordam a teoria de perturbação. Após 1920, Duffing e van der Pol realizaram estudos que encontraram as primeiras soluções definidas da teoria de vibração não lineares e chamaram a atenção por sua importância a engenharia (RAO, 2008).

Acontecimentos com perturbação e características aleatórias estão presentes em diversos fenômenos como terremotos, ventos, transporte de mercadorias em veículos com rodas e ruídos de foguetes e motores a jato. Com tantos fenômenos presentes em nosso dia a dia fez necessário desenvolver conceitos e métodos para análise de vibrações e seus efeitos aleatórios (RAO, 2008).

Há um pouco mais de 30 anos atrás até mesmo os estudos de sistemas mais complexos de engenharia, utilizaram modelos grosseiros e com poucos graus de liberdade. Contudo, em 1950, com o avanço da tecnologia e o uso de computadores de alta velocidade de solução, possibilitou o tratamento de sistemas de moderada complexidade e a geração de soluções aproximadas em forma semi-definida recorrendo a métodos clássicos de solução (RAO, 2008).

O desenvolvimento simultâneo do método de elementos finitos possibilitou aos engenheiros usarem computadores digitais para realização de análises numéricas detalhadas de vibrações de sistemas mecânicos, veiculares e estruturais de alta complexabilidade, com inúmeros graus de liberdade (RAO, 2008).

Figura 11 – Danos estruturais em Edifícios causado por vibrações induzida por vento e terremotos leves



Fonte: Inman (2007)

2.6.1 Importância do estudo da vibração

A vibração esta presente no nosso dia a dia, nos equipamentos que utilizamos, nos veículos que nos transportam, e ate mesmo no nosso corpo. Nosso ouvido vibra para ouvirmos, nossos cordas vocais vibram para falarmos, ate nossos braços e pernas fazem movimentos oscilatórios.

Figura 12 – Trincas causadas pelo efeito de vibração de ferrovias



Fonte: Brito *et al.* (2014)

O observar das coisas naturais e o desenvolvimento da humanidade fez com que estudiosos, desenvolvessem teorias matemáticas para que se pudesse resolver problemas físicos, como também analisa-los melhor.

Atualmente a engenharia busca cada dia mais entender e solucionar problemas envolvendo vibrações, seja ela ligada a motores, veículos e estruturas civis, como fundações, edificações, pontes, etc. Por seu efeito negativo, são estudados soluções em que se minimize esse fenômeno, para que tenhamos menos danos nessas estruturas citadas anteriormente.

2.7 FONTES E EFEITOS DAS VIBRAÇÕES

As vibrações provenientes do tráfego tiveram origem a partir do adensamento urbano, provocando o aumento da temperatura nesses centros, gerando microclimas desconfortáveis a população, isso fez com que as edificações precisassem de climatização artificial, já que as edificações tiveram sua eficiência reduzida (BACCI, 2003).

Além do desconforto térmico, o adensamento urbano, provocou incomodo sonoro, esse que provoca além de desconforto aos usuários, problemas estruturais as edificações, devido ao seu efeito vibratório. Esse incomodo esta diretamente ligado a distancia em que a fonte de vibração se encontra do receptor (AZEVEDO; PATRÍCIO, 2001).

Em geral o distanciamento das edificações é exigido por legislação municipal, mas devido ao crescimento de grandes centros urbano, foi-se reduzindo o tamanho deste recuo, afim de aumentar a área de ocupação dos terrenos, e/ou alargamento de vias rodoviárias (CHAVES, 2008).

O aumento populacional dos grandes centros, também ocasionou um numero maior de veículos circulando. De acordo com François *et al.* (2007) o trafego de automóveis pode gerar ondas vibratórias que afetam as estruturas de edificações, desde sua fundação. Esse fenômeno de vibração causado pelo trafego de veículo, esta relacionado com a sua velocidade, seu peso e as condições do pavimento em que trafega.

Segundo Hunaidi (2000) a geração de ondas vibratórias aumenta quando há irregularidades no pavimento, pois ampliam o impacto da suspensão dos veículos, principalmente nos solos de baixo amortecimento. Essas vibrações atingem primeiramente as fundações das edificações, sendo elas as responsáveis por fazer a ligação solo-estrutura, em que passam todo esforço e pesos para o solo, proporcionando estabilidade da edificação (KIM; LEE, 2000).

De acordo com a norma BS 7385-2 BRITISH STANDARD (1993), a faixa de frequência induzida pela onda vibratória que se propaga pelo solo na edificação também deve ser considerada, já que seus componentes, como paredes, pisos e forros, possuem frequências naturais maiores que as da estrutura, sendo mais influenciados, principalmente, pela vibração contínua, em consequência do baixo amortecimento. Caso a frequência de ressonância da estrutura da edificação seja similar à frequência de propagação da onda vibratória, haverá amplificação do deslocamento do solo, ocasionando reações indesejadas.

2.8 VIBRAÇÕES NO SOLO

Com o adensamento urbano gerado nos últimos anos, foi inevitável a aproximação das edificações de tráfegos viários e ferroviários, esses dois meios de infraestrutura de transporte por receberem cargas frequentes da passagem de veículos e trens acabam por gerar esforço no solo, essas cargas em contato com o solo, geram forças transversais, longitudinais e verticais, esses esforços se propagam pelo solo como ondas, assim denominado vibração.

a Vibração gerada pelo trafego se dissipa pelo solo, transmitindo a energia gerada em ondas vibratórias aos elementos que estão próximos de sua zona de propagação, sendo assim a fundação de edifícios próximos a infraestruturas de transporte acaba por receber essa energia.

A propagação das ondas vibratórias no solo é influenciada por seu tipo, e vão perdendo

força principalmente com o aumento da distância, do emissor para o receptor, já que, desta forma, há um incremento de área na frente de onda, reduzindo sua frequência. Esse processo pode ocasionar o adensamento do solo, principalmente os arenosos, com o risco de recalques diferenciais, aos quais até mesmo as estruturas e fundações mais sólidas não são capazes de resistir, podendo haver o rompimento (CHAVES, 2008).

De acordo BS 7385-2 BRITISH STANDARD (1993), solos mais rígidos, a propagação da energia vibratória ocorre em maiores velocidades, então a tensão gerada nas fundações e consequentemente, o pico da velocidade da partícula (PVP) são inversamente proporcionais, tanto para ondas de compressão quanto para as de cisalhamento, ou seja, quanto mais resistente o solo, maior a velocidade de propagação da onda de vibração e menor a força gerada nas fundações dos edifícios. Dessa forma, em solos menos rígidos, nos quais a velocidade de propagação da energia vibratória é menor, as fundações poderão ter tensões similares às que são geradas em solos rígidos, mesmo com pequenos PVP.

Essa vibração gerada no solo acaba por afetar edificações como um todo, seja ela de forma leve como fissuras e trincas nas paredes, desconfortos auditivos e visuais para os usuários, como formas mais graves, gerando muito desconforto aos ocupantes, afetando a segurança da edificação, podendo até mesmo causar colapso de uma estrutura. Por esse motivo autoridades e órgãos responsáveis pela fiscalização e execução de edifícios já vem tentando criar soluções para a redução desses danos (FILHO; ARAÚJO, 2020).

As ondas de vibração do solo chega as edificações pela ligação solo-estrutura, sendo a fundação a parte da estrutura em contato direto com o solo. Esse problema ainda não é completamente entendido, pois o mesmo varia com a interação das cargas das vias viárias e ferroviárias, além disso a propagação da onda depende o tipo do solo e seu amortecimento, velocidade dos veículos, tipos de cargas entre outros fatores que afetam a amplitude e a frequência das vibrações geradas.

2.8.1 Tipos de Ondas

As cargas em contato com o solo, geram forças transversais, longitudinais e verticais, esses esforços se propagam pelo solo como ondas. Essas ondas estão divididas em ondas de corpo ou de volume e de superfície.

As ondas de corpo propagam-se no interior do solo, contendo dois tipos delas, as chamadas ondas primárias mais conhecida com onda P, e as secundárias, chamadas de ondas S

(FILHO; ARAÚJO, 2020), conforme Figura 13.

Ondas P, são ondas longitudinais e fazem com que o solo vibre paralelamente à direção da onda, esse tipo de onda chegam rapidamente a superfície, por sua velocidade de propagação ser maior. Também conhecida como ondas de compressão, tem amplitudes menores, proporcionam aos corpos sólidos alterações de volume, sem alterações na forma (FILHO; ARAÚJO, 2020).

Ondas S são ondas transversais, e também conhecidas com onda de cisalhamento, pois solo se deslocado perpendicularmente à direção de propagação. Elas são mais lentas que as ondas P, por isso chegam depois a superfície e propagam-se apenas em corpos sólidos. Sem alterar o volume, provocam alteração na forma, e tem amplitude muito maior que das ondas P, porém são menores do que as ondas superficiais (FILHO; ARAÚJO, 2020).

Ondas de superfície, propagam imediatamente na superfície terrestre, com velocidade menor que das ondas de corpo, mas aproximadamente constante. Contudo, estas ondas são mais destrutivas, devido à sua baixa frequência, longa duração e grande amplitude. Essa onda é a resultante entre a interação de ondas P e S com a superfície (FILHO; ARAÚJO, 2020).

As ondas Rayleigh também conhecidas como ondas R, são um tipo de onda superficial que provoca vibração no sentido contrário à propagação da onda. Segundo BAHREKAZEMI (2004), as ondas R, podem ser dividida em uma componente vertical e em outra horizontal, sendo que ambas decaem com a profundidade, no entanto, com proporções distintas.

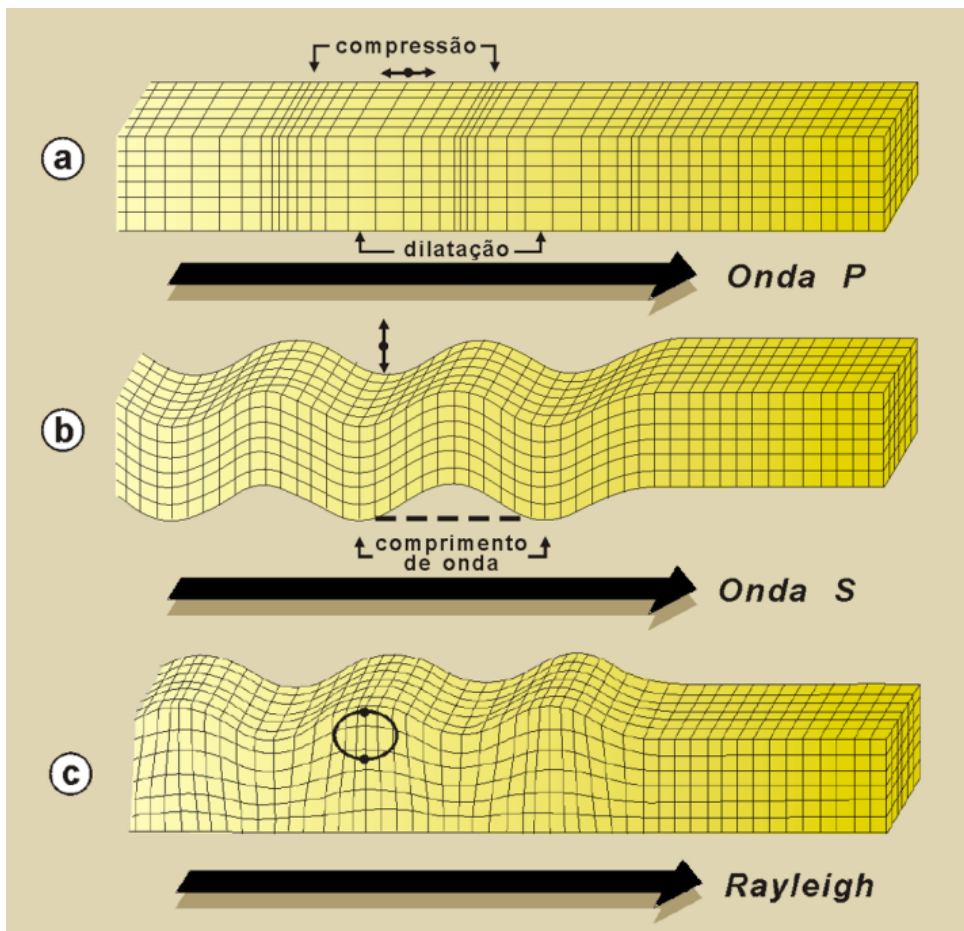
2.9 ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é um método numérico no qual equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de forma aproximada (FISH; BELYTSCHKO, 2007). Na engenharia, os principais usos deste método se dão nas áreas de análise de tensões, transferência de calor, fluxo de fluídos e eletromagnetismo através de simulações computacionais.

O método leva em conta que em corpos contínuos, as tensões e deformações variam de forma contínua ao longo do domínio do corpo, tensões e deformações estas, que são regidas por equações diferenciais. A ideia principal do método é dividir o elemento em uma série de regiões menores, as quais, são regidas pelas mesmas equações diferenciais e são resolvidas de forma aproximada. Assim, fazendo o acoplamento das equações de cada pequena região, o comportamento do corpo inteiro é determinado.

A divisão do corpo em pequenas regiões cria os chamados “elementos finitos”, que são

Figura 13 – Forma de propagação da (a) onda P; (b) onda S; (c) onda de Rayleigh



Fonte: Adaptado Teixeira *et al.* (2003)

conectados por nós em casos unidimensionais, ou linhas para casos bidimensionais e superfícies para casos tridimensionais, como pode ser visto na Figura 14. O número de variáveis num nó é igual ao grau de liberdade no mesmo nó.

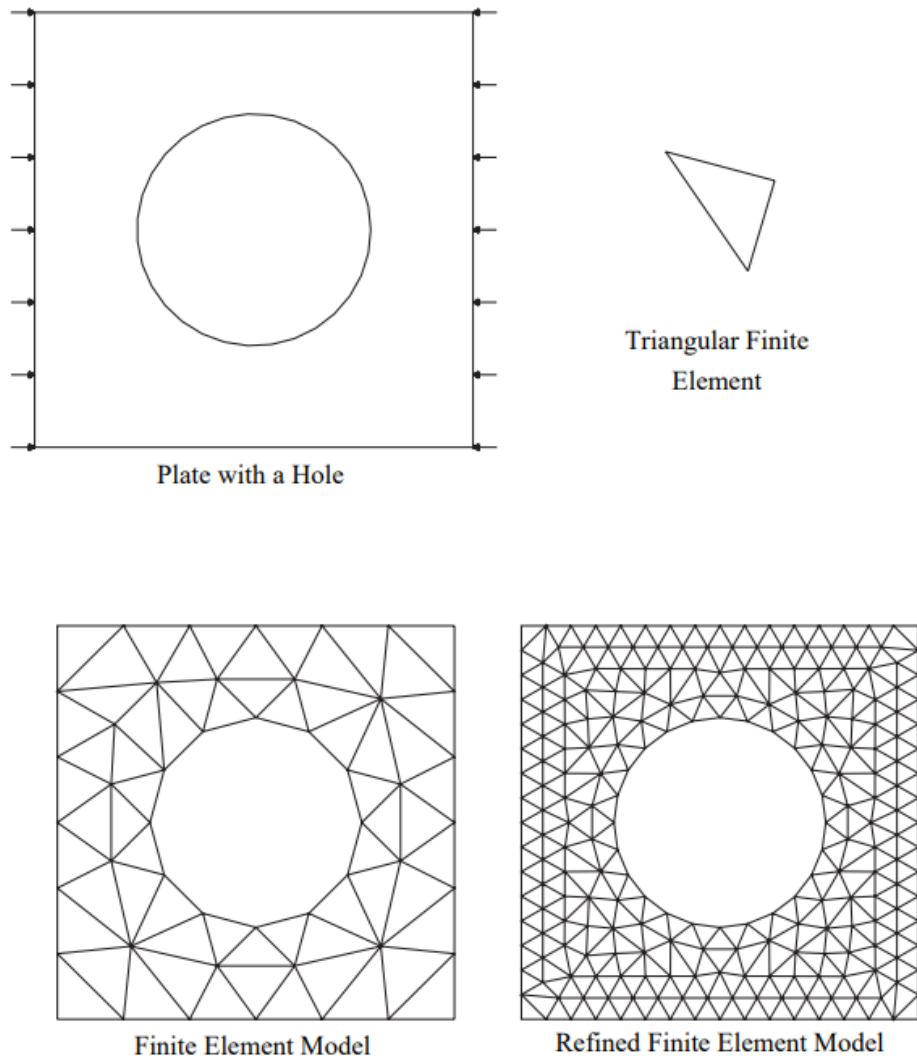
Através do uso de teorias baseadas no princípio dos trabalhos virtuais, relações deformação-deslocamentos e deformações-tensões, pode-se escrever o sistema que governa o equilíbrio dos elementos finitos e da estrutura como um todo da seguinte forma (ZIENKIEWICZ *et al.*, 2013).

$$F = KU. \quad (1)$$

onde F é o vetor que contém as forças aplicadas no elemento e U o vetor que contém os deslocamentos nodais. K é a matriz rigidez, que relaciona as forças nos nós com seus deslocamentos.

Segundo ZIENKIEWICZ *et al.* (2013), o comportamento dinâmico de estruturas elásticas com amortecimento linear é regido pela seguinte equação diferencial:

Figura 14 – Geometria, Cargas e Elementos Finitos



Fonte: Fish e Belytschko (2007)

$$M(\ddot{\delta}) + C(\dot{\delta}) + K(\delta) + f = 0. \quad (2)$$

onde M é a matriz de massa global, C é a matriz de amortecimento (de qualquer tipo) do sistema e K a matriz rigidez global da estrutura. Estes serão desenvolvidos nos tópicos seguintes. f é a matriz de forças, δ é o deslocamento, $\dot{\delta}$ a velocidade e $\ddot{\delta}$ a aceleração do elemento ou estrutura.

2.9.1 Matriz Rigidez - Unidimensional

Devido a simplicidade, será usado um elemento unidimensional para demonstrar o desenvolvimento da matriz rigidez deste elemento. As hipóteses e o desenvolvimento serão conforme Fish e Belytschko (2007) apresenta. Hipóteses:

- I. A barra é contínua em seu domínio;
- II. Seu comportamento segue a Lei de Hooke para casos unidimensionais;
- III. Suporta apenas esforços axiais, isto é, não transmite flexão, cisalhamento ou torção.

Considerando o elemento finito e , Figura 15. Devido as hipóteses, os únicos esforços não nulos são as forças axiais ao elemento, as quais são colineares ao eixo da barra. Portanto, a tensão axial constante na seção da barra é:

$$\sigma = \left(\frac{p}{A}\right) \quad (3)$$

onde p é a força interna na seção e A sua seção transversal.

Figura 15 – Elemento de treliça com dois nós



Fonte: Adaptado Fish e Belytschko (2007).

Considerando que o elemento está em equilíbrio, a soma das forças internas nodais agindo no elemento é igual a zero, ou seja:

$$F1 + F2 = 0 \quad (4)$$

De acordo com a Lei de Hooke, que relaciona linearmente tensão e deformação, temos:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\delta}{l}\right) \quad (6)$$

Onde ε é a deformação, l é o comprimento inicial do elemento e δ é a razão de alongação em relação ao comprimento original do elemento.

É importante convencionar que a força interna p é positiva em tensão e negativa em compressão (FISH; BELYTSCHKO, 2007).

Para o desenvolvimento da matriz rigidez denotaremos a matriz de forças internas por F e a matriz de deslocamentos por d . Para este elemento temos:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

Utilizando a equação de equilíbrio Equação 4 e da lei de Hooke Equação 5, temos:

$$F_2 = p = A\sigma = AE\varepsilon = AE\left(\frac{\delta}{l}\right) \quad (7)$$

A alongação de um elemento expressa em termos de deslocamentos pode ser expressa como:

$$\delta = U_2 - U_1 \quad (8)$$

Assim,

$$l_{novo} = l + \delta = l + U_2 - U_1 \quad (9)$$

Substituindo Equação 8 em Equação 7, temos:

$$F_2 = k(U_2 - U_1) \quad (10)$$

Onde k é dado por:

$$k = \left(\frac{AE}{l}\right) \quad (11)$$

Da equação de equilíbrio temos que $F_1 = -F_2$, portanto:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Da Equação 1 temos:

$$F = Kd, \text{ onde } K = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} = \left(\frac{AE}{l}\right) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

K representa a matriz rigidez do elemento finito e é utilizada para construir a matriz de rigidez global da estrutura e d é matriz dos deslocamentos nodais. A mesma matriz rigidez pode ser usada para qualquer elemento de área constante A da barra (FISH; BELYTSCHKO, 2007).

2.9.2 Matriz Rigidez - Bidimensional

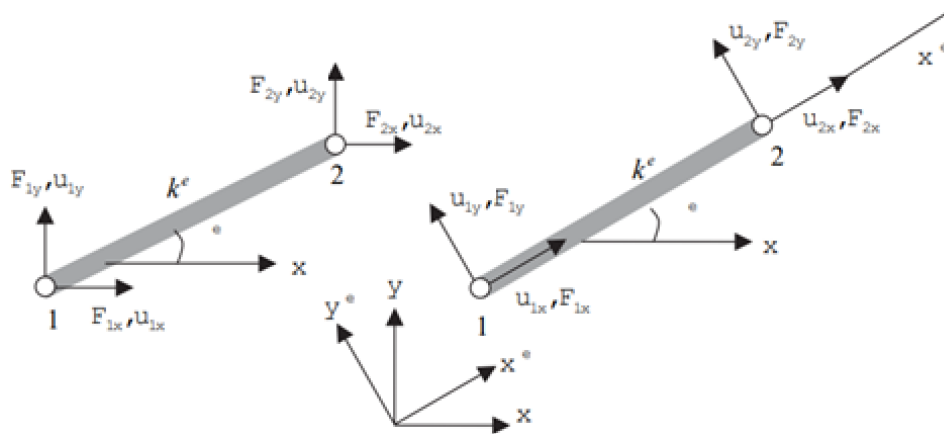
Neste caso, a força normal a seção transversal e os deslocamentos são decompostos em componentes em relação a um sistema global de coordenadas. No caso da Figura 16, o sistema global são os eixos $x - y$.

O desenvolvimento é semelhante ao caso unidimensional. Neste caso, apenas deve-se levar em conta o ângulo ϕ do elemento em relação ao eixo x e as componentes das forças F_1 e F_2 e dos deslocamentos u_1 e u_2 .

Portanto, segundo Fish e Belytschko (2007), temos para este caso:

$$F = \begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ u_{2x} \\ u_{2y} \end{bmatrix}$$

Figura 16 – Elemento de treliça com dois nós e sistema de Coordenadas



Fonte: Fish e Belytschko (2007).

$$K = \left(\frac{AE}{l} \right) \begin{bmatrix} \cos^2\phi & \cos\phi\text{sen}\phi & -\cos^2\phi & -\cos\phi\text{sen}\phi \\ \cos\phi\text{sen}\phi & \text{sen}^2\phi & -\cos\phi\text{sen}\phi & -\text{sen}^2\phi \\ -\cos^2\phi & -\cos\phi\text{sen}\phi & \cos^2\phi & \cos\phi\text{sen}\phi \\ -\cos\phi\text{sen}\phi & -\text{sen}^2\phi & \cos\phi\text{sen}\phi & \text{sen}^2\phi \end{bmatrix}$$

2.9.3 Matriz Rigidez - Tridimensionais

O elemento mostrado na Figura 17. Considerando que o elemento está sobre uma força de tração, podemos escrever a relação entre forças nodais e deslocamentos nodais no sistema de coordenadas local como:

$$\begin{bmatrix} F_1^{le} \\ F_2^{le} \end{bmatrix} = k^e \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^{le} \\ u_2^{le} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Os graus de liberdade incluídos nas matrizes de deslocamento e força do elemento acima são os únicos que estão envolvidos na rigidez do sistema.

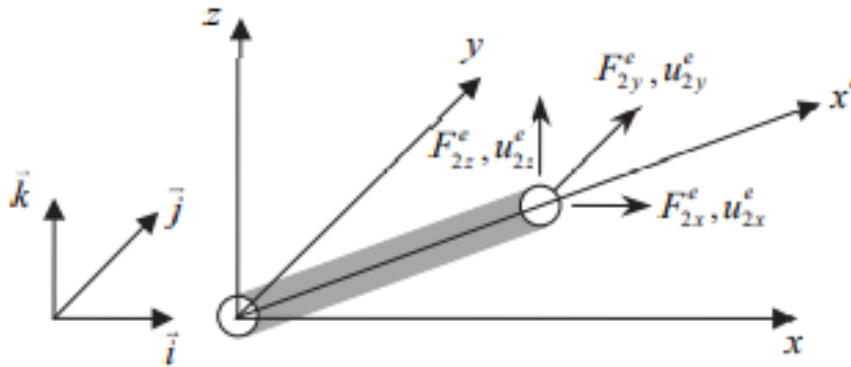
O elemento em três dimensões terá três graus de liberdade por nó: componentes de translação nos eixos \$x\$, \$y\$ e \$z\$ assim:

$$d^e = \begin{bmatrix} u_{1x}^e & u_{1y}^e & u_{1z}^e & u_{2x}^e & u_{2y}^e & u_{2z}^e \end{bmatrix} \quad (15)$$

E a matriz de força é:

$$F^e = \begin{bmatrix} F_{1x}^e & F_{1y}^e & F_{1z}^e & F_{2x}^e & F_{2y}^e & F_{2z}^e \end{bmatrix} \quad (16)$$

Figura 17 – Elemento de treliça tridimensional na coordenada local



Fonte: Fish e Belytschko (2007).

Para obter a equação de rigidez em termos das forças nodais e deslocamentos Equação 16 e Equação 15, respectivamente, construímos agora a matriz de rotação R^e .

O vetor unitário ao longo do elemento é dado por:

$$\vec{i}' = \frac{1}{l^e} (x_{21}^e \vec{i} + y_{21}^e \vec{j} + z_{21}^e \vec{k}) \quad (17)$$

onde $x_2^e - x_1^e$ e assim por diante, temos

$$u_{Ix}^e \vec{i}' + u_{Iy}^e \vec{j}' + u_{Iz}^e \vec{k}' = u_{Ix}^e \vec{i} + u_{Iy}^e \vec{j} + u_{Iz}^e \vec{k} \quad (18)$$

Para $I = 1$ e 2 .

$$u_{Ix}^e = u_{Ix}^e \vec{i}' \cdot \vec{i} + u_{Iy}^e \vec{j}' \cdot \vec{i} + u_{Iz}^e \vec{k}' \cdot \vec{i} \quad (19)$$

Substituindo Equação 17 em Equação 19, temos:

$$u^e_{Ix} = \frac{1}{l^e} [x^e_{21} u^e_{1x} + y^e_{21} u^e_{1y} + z^e_{21} u^e_{1z}] \quad (20)$$

Usando o acima para escrever as relações entre d'^e e d^e , temos

$$\begin{bmatrix} u^e_{1x} \\ u^e_{2x} \end{bmatrix} = \frac{1}{l^e} \begin{bmatrix} x^e_{21} & y^e_{21} & z^e_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x^e_{21} & y^e_{21} & z^e_{21} \end{bmatrix} d^e \quad (21)$$

$$R^e = \begin{bmatrix} x^e_{21} & y^e_{21} & z^e_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x^e_{21} & y^e_{21} & z^e_{21} \end{bmatrix}$$

O que define a matriz R^e . A rigidez global é da por:

$$K^e = T^{eT} \hat{K}^e T^e \quad (22)$$

A Equação 22 qual foi deduzida por Fish e Belytschko (2007) no livro *A First Course in Finite Elements* no capítulo dois seção 2.5 - A Lei da Transformação. Esta equação transforma a rigidez do elemento em relação ao sistema de coordenada local para o sistema de coordena global. Então com a Equação 22 temos:

$$K^e = R_6^{eT} K_2^{le} R_2^e$$

onde K^e é a matriz dada em Equação 14 e R^e foi mostrada na Equação 21. O resultado é uma matriz 6x6. Que pode ser feito facilmente dentro de um programa de computador.

Este procedimento também pode ser usado para obter a rigidez do elemento em duas dimensões: a matriz R^e seria então a matriz 2X4 com as colunas com Z^e_{21} .

2.9.4 Matriz Rigidez - Global

Após o cálculo da matriz rigidez de cada elemento, o próximo passo é a construção da matriz rigidez global da estrutura. A construção desta matriz se dá pela soma direta de cada matriz de rigidez, e é chamado de Método de Rigidez Direto (DSM), a matriz de rigidez global, K_G , tem a seguinte forma:

$$K_G = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1m} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{m1} & \dots & \dots & K_{nm} \end{bmatrix} \quad (23)$$

onde K_{11} , K_{12} , etc., são submatrizes quadradas de tamanho $l \times l$, onde l é o número de componentes de forças e deslocamentos em cada nó (ZIENKIEWICZ *et al.*, 2013).

2.9.5 Matriz Massa de um Elemento e Matriz massa Global

Para a determinação da matriz massa, novamente será usado um modelo simples de um elemento com três nós, Figura 18. A massa M deste elemento é dada por:

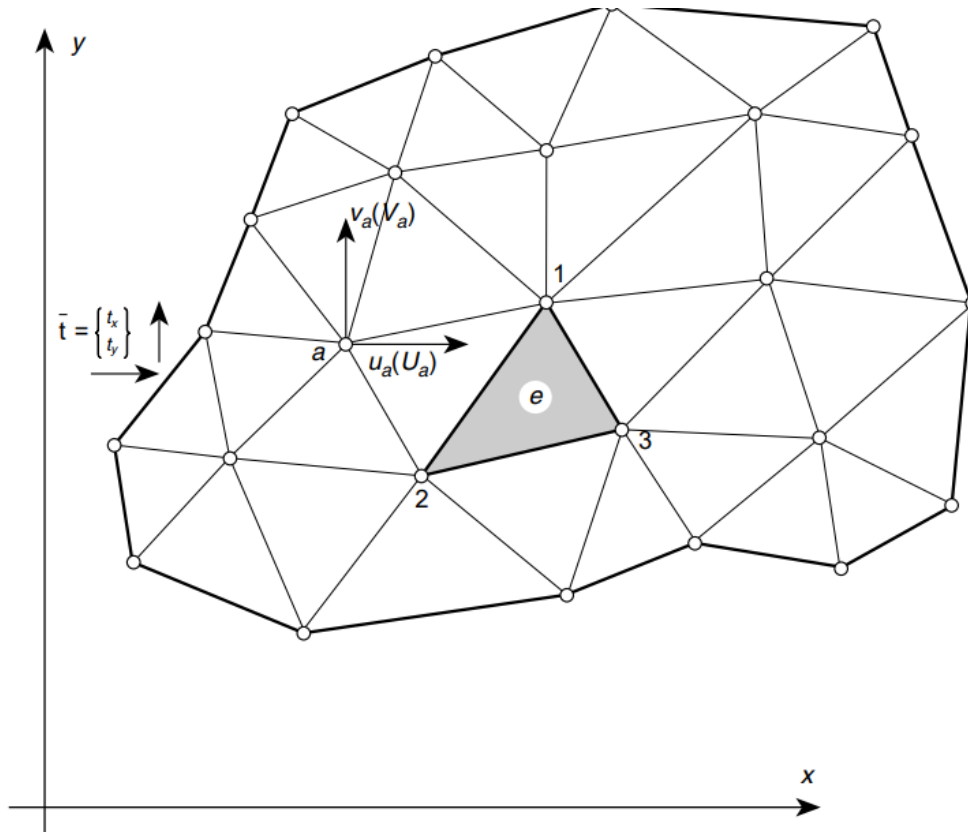
$$M = \rho h \iint N^T N \, dx \, dy \quad \text{ou} \quad M_{ab} = \rho h I \iint N_a N_b \, dx \, dy \quad (24)$$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix}$$

onde, N_a é a função de forma e é determinada pela geometria do elemento, ρ é a densidade do material e h sua espessura, assumida ser constante no elemento, (ZIENKIEWICZ *et al.*, 2013).

$$\iint N_a N_b \, dx \, dy = \begin{cases} \frac{1}{6} \Delta & \text{se } a = b \\ \frac{1}{12} \Delta & \text{se } a \neq b \end{cases} \quad (25)$$

Figura 18 – Elemento de treliça com três nós



Fonte: ZIENKIEWICZ *et al.* (2013).

a e b são variáveis da função de forma e também dependem da forma do elemento, Δ neste caso é a área do triângulo.

A massa total do elemento é:

$$m = \rho h \cdot \Delta \quad (26)$$

Portanto, a matriz massa será:

$$M = \frac{m}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Esta matriz é chamada de Matriz de Massa Consistente.

A Matriz de Massa Consistente pode conter termos nas duas diagonais e foras delas. Resolver problemas dinâmicos com esses termos exige um maior esforço computacional.

Deste modo, a Matriz de Massa Concentrada é mais utilizada devido a sua simplicidade. O método utilizado para formular a Matriz de Massa Consistente em uma matriz diagonalizada é chamado de *lumping*.

Se considerarmos que a massa é fisicamente concentrada nos nós em três partes iguais, ou utilizando o método *RowSumLumpingMethod*, que consiste em somar os elementos de uma coluna no termo da diagonal, temos que a Matriz de Massa Concentrada é para este caso é:

$$M = \frac{m}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Do mesmo modo, aplicando para a Matriz de Massa Global M_G :

$$M_G = \frac{m_t}{n} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

onde n é o número de nós na estrutura e m_t sua massa total.

2.9.6 Sistemas Tridimensional de vários graus de Liberdade

Os sistemas tridimensionais de n graus de liberdade livres são utilizados para retratar edificações, prédios, etc. Sendo o sistema de coordenadas de referencia adotado os eixos, x , y e z , como apresentado no subseção 2.9.3. E é descrita pela equação de movimento Equação 30.

$$[M]\{d''(t)\} + [c]\{d'(t)\} + [K]\{d(t)\} = \{F(t)\} \quad (30)$$

$\{d''(t)\}, \{d'(t)\}$ e $\{d(t)\}$ são, respectivamente, os vetores posição, velocidade e aceleração de todos os n graus de liberdade livres no tempo t [m, m/s, m/s²]; M é a matriz de massa de todos os n graus de liberdade livres; K é a matriz de rigidez de todos os n graus de liberdade livres; c é a matriz de amortecimento de todos os n graus de liberdade livres; $\{F(t)\}$ é o vetor força externa variável aplicado aos n graus de liberdade livres projetado nos respectivos eixos dos graus de liberdade livres no tempo t ; t é o tempo;

Para análise modal apenas as matrizes de massa M e de rigidez K serão estudadas. Esses dois elementos apresentam particularidades e devem ser detalhados. Por isso consideramos vibração livre não amortecida, dada pela Equação 31:

$$[M]\{d''(t)\} + [K]\{d(t)\} = \{0\} \quad (31)$$

As matrizes de massa e de rigidez para um sistema tridimensional de n graus de liberdades livres é criada do mesmo modo que para um sistema unidimensional de n graus de liberdades livres:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & K_{12} & \dots & M_{1m} \\ M_{21} & K_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & \dots & \dots & M_{nm} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1m} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{m1} & \dots & \dots & K_{nm} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Encontramos as frequências naturais e modos de vibração utilizando a seguinte equação:

$$[[k] - w_n^2[m]]\{\varphi\} = \{0\} \quad (34)$$

Aonde M é a matriz de massa de todos os n graus de liberdade livres, K é a matriz de rigidez de todos os n graus de liberdade livres, W_n^2 é o quadrado da frequência natural de vibração, $\{\varphi\}$ é o vetor coluna dos modos de vibração e $\{0\}$ é o vetor coluna nulo.

As frequências naturais de vibração e os modos de vibração são determinados através de n graus de liberdade livres. Ou seja, deve-se revolver a equação polinomial gerada em $\det([k] - w_n^2[m]) = \{0\}$, a qual fornecerá n valores para as frequências naturais de vibração. O i -ésimo modo de vibração $\{\varphi^i\}$ está associado à sua respectiva i -ésima W_i^2 frequência natural de vibração.

Sendo assim a solução da Equação 31, sera dada por:

$$\{d(t)\} = \sum_{i=1}^n \{\varphi^i\} A_i \cos(w_i t + \varphi^i) \quad (35)$$

A qual representa o Princípio da Superposição Modal (RAO, 2008). Em que $\{d(t)\}$ é o vetor coluna com a equação de movimento dos n graus de liberdade livres no tempo t tal que $\{d(t)\} = \{d_1(t), d_2(t), \dots, d_n(t)\}^T$, $\{\varphi^i\}$ é o i -ésimo vetor coluna do modo de vibração associado à W_i^2 que é a i -ésima frequência natural de vibração, A_i e φ^i são constantes a serem determinadas com as condições iniciais, n é o número de graus de liberdade livres, i é o índice do grau de liberdade livre e t é o tempo.

2.9.7 Malha de Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é amplamente utilizado para resolver problemas envolvendo estruturas complexas feitas de vários materiais. Dentro do MEF, a estrutura sob investigação é dividida em pequenas regiões (os chamados elementos finitos), que permitem a discretização da estrutura. Esses elementos podem ter uma variedade de formas, como triângulos e quadrados em sistemas 2D e prismas ou quadriláteros em sistemas 3D. A escolha da geometria depende do tipo de estrutura que está sendo analisada (PUC-RIO, 2023c).

O refinamento de malha é uma técnica fundamental no processo de simulação de elementos finitos utilizada para melhorar a precisão e convergência dos resultados da análise. A ideia por trás do refinamento de malha é subdividir uma determinada região da geometria em elementos menores para uma representação mais detalhada e precisa do comportamento do sistema em análise.

Para geração malha do nosso modelo, primeiro atribuímos ao nosso modelo numérico a malha tipo Sizing, uma para a laje, outra para os quatro pilares, e uma terceira para a fundação. Atribuindo a malha pelo comando Sizing podemos configurar tamanho do elemento, número de divisões ao longo de uma aresta, uso de esfera ou corpo de influência, tamanho mínimo, etc (Ansys®, 2023).

2.10 ANÁLISE DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

2.10.1 Análise Modal

Segundo He e Fu (2001) análise modal é o processo de determinar as características dinâmicas inerentes de um sistema em formas de frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais, e usá-los para formular um modelo matemático para seu comportamento dinâmico. O modelo matemático formulado é referido como o modelo modal do sistema e as informações para as características são conhecidas como seus dados modais.

A dinâmica de uma estrutura é fisicamente decomposta por frequência e posição. Isso é claramente evidenciado pela solução analítica de equações diferenciais parciais de sistemas contínuos como vigas e cordas. A análise modal baseia-se no fato de que a resposta à vibração de um sistema dinâmico linear invariante no tempo pode ser expressa como a combinação linear de um conjunto de movimentos harmônicos simples chamados modos naturais de vibração (HE; FU, 2001).

Os modos naturais de vibração são inerentes a um sistema dinâmico e são completamente determinados por suas propriedades físicas (massa, rigidez, amortecimento) e suas distribuições espaciais. Cada modo é descrito em termos de seus parâmetros modais: frequência natural, fator de amortecimento modal e padrão de deslocamento característico, ou seja, forma do modo (HE; FU, 2001).

A forma do modo pode ser real ou complexa, e cada um corresponde a uma frequência natural. O grau de participação de cada modo natural na vibração global é determinado tanto

pelas propriedades da(s) fonte(s) de excitação quanto pelas formas dos modos do sistema. A análise modal abrange técnicas teóricas e experimentais (HE; FU, 2001).

Modelo modal retrata explicitamente as características dinâmicas de um sistema. Portanto, as aplicações da análise modal estão intimamente relacionadas à utilização do modelo modal derivado no projeto, resolução de problemas e análise. A análise modal teórica baseia-se na descrição das propriedades físicas de um sistema para derivar o modelo modal. Tal descrição geralmente contém as matrizes de massa, rigidez e amortecimento do sistema (HE; FU, 2001).

Segundo He e Fu (2001) essas propriedades podem ser dadas em formas de equações diferenciais parciais. Um exemplo é a equação de onda de uma corda vibratória uniforme estabelecida a partir de sua distribuição de massa e propriedades de elasticidade. A solução da equação fornece as frequências naturais e formas de modo da corda e suas respostas de vibração forçada.

No entanto, um modelo físico mais realista geralmente compreenderá as propriedades de massa, rigidez e amortecimento em termos de suas distribuições espaciais, ou seja, as matrizes de massa, rigidez e amortecimento. Essas matrizes são incorporadas a um conjunto de equações diferenciais normais de movimento. O princípio de superposição de um sistema dinâmico linear nos permite transformar essas equações em um típico problema de autovalor. Sua solução fornece os dados modais do sistema (HE; FU, 2001).

Assim, é um caminho dos dados espaciais para o modelo modal. A análise modal experimental obtém o modelo modal a partir de dados de FRF medidos ou dados de resposta de vibração livre medidos. Assim, é um caminho dos dados de resposta para o modelo modal. Uma vez que o modelo modal é derivado, várias aplicações podem ser iniciadas. Algumas aplicações da análise modal envolvem o uso direto de dados modais da medição, enquanto outras usam esses dados para análise posterior (HE; FU, 2001).

A análise modal, dispõe uma frequência natural para cada modo, a frequência natural é um fenômeno que ocorre em um sistema, após um distúrbio inicial, e ele vibra por si só. Então o corpo oscila sem a presença de forças externas, isso é conhecido como frequência natural (SHIGLEY, 1969).

2.10.2 Análise Harmônica

A análise harmônica é empregada para avaliar os modos de vibração que exercem a maior influência na resposta dinâmica de uma estrutura. Isso envolve identificar e estudar os

componentes harmônicos nas vibrações, visando compreender quais modos de vibração são mais significativos em termos de contribuição para o comportamento estrutural em resposta a forças ou excitações. Picos na resposta acontecem quando as frequências das forças coincidem com as frequências naturais da estrutura. Isso resulta em um aumento significativo na amplitude da resposta da estrutura, um fenômeno conhecido como ressonância (PUC-RIO, 2023a).

Quando uma força externa é aplicada a um sistema de vibração, isso é chamado de vibração forçada. O movimento forçado pode ser expresso em termos dos modos normais de vibração, e a resposta total pode ser obtida como a superposição da solução de equações modais independentes. Em outras palavras, os modos normais podem ser usados para transformar o sistema de equações diferenciais acopladas em um conjunto de equações diferenciais desacopladas, em que cada equação contém apenas uma variável dependente. Assim, o método de superposição modal reduziu o problema de encontrar a resposta de um sistema com vários graus de liberdade à determinação da resposta de sistemas com um único grau de liberdade. (PAZ; LEIGH, 2004).

2.10.3 Método da Superposição Modal

O método da superposição modal, mostra que o movimento forçado de um sistema pode ser expresso em termos dos modos normais de vibração (PAZ; LEIGH, 2004).

As equações para o método de superposição modal apresentadas nesse trabalho são descritas por Paz e Leigh (2004).

A equação de movimento apresentada na Equação 36, para o caso particular de um edifício de cisalhamento de dois graus de liberdade é dada pela Equação 37 e Equação 38.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_0 \sin(\omega t + \beta) \quad (36)$$

$$m\ddot{u} + (k_1 + k_2)u - k_2u_2 = F_1 \quad (37)$$

$$mu_2 - k_2u_2 + k_2u_2 = F_2(t) \quad (38)$$

Procuramos transformar este sistema acoplado de equações diferenciais em um sistema de equações independentes ou desacopladas em que cada equação contém apenas uma função desconhecida do tempo. É primeiro necessário expressar a solução em termos dos modos normais multiplicados por alguns fatores que determinam as contribuições de cada um. No caso do movimento livre, esses fatores eram funções senoidais do tempo; no presente caso, para o

movimento forçado, são funções gerais do tempo que designamos como $z(t)$. Portanto, a solução é assumida como sendo da forma:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= a_1 z_1(t) + a_2 z_2(t) \\ u_2(t) &= a_1 z_1(t) + a_2 z_2(t) \end{aligned} \quad (39)$$

Após a substituição na equação, obtemos:

$$\begin{aligned} m_1 a_{11} \ddot{z}_1 + (k_1 + k_2) a_{11} z_1 - k_2 a_{21} z_1 + m_1 a_{12} \ddot{z}_2 + (k_1 + k_2) a_{12} z_2 - k_2 a_{22} z_2 &= F_1(t) \\ m_2 a_{21} \ddot{z}_1 - k_2 a_{11} z_1 + k_2 a_{21} z_1 + m_2 a_{22} \ddot{z}_2 - k_2 a_{12} z_2 + k_2 a_{22} z_2 &= F_2(t) \end{aligned} \quad (40)$$

Para determinar as funções apropriadas $z_1(t)$ e $z_2(t)$ que irão desacoplar a Equação 40, é necessário fazer uso das relações de ortogonalidade para separar os modos. As relações de ortogonalidade são usadas multiplicando a primeira equação da equação Equação 40 por a_{11} , e a segunda por a_{21} . A adição dessas equações após multiplicação e simplificação usando a Equação 41 e Equação 42

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + F_s(u) = F(t) \quad (41)$$

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + F(u_{i+1}) = F(t_{i+1}) \quad (42)$$

Obtemos:

$$(m_1 a_{11}^2 + m_2 a_{21}^2) \ddot{z}_1 + \omega_1^2 (m_1 a_{11}^2 + m_2 a_{21}^2) z_1 = a_{11} F_1(t) + a_{21} F_2(t) \quad (43)$$

Da mesma forma, multiplicando a primeira das equações Equação 40 por a_{12} , e a segunda por a_{22} , obtemos:

$$(m_1 a_{12}^2 + m_2 a_{22}^2) \ddot{z}_2 + \omega_2^2 (m_1 a_{12}^2 + m_2 a_{22}^2) z_2 = a_{12} F_1(t) + a_{22} F_2(t) \quad (44)$$

Os resultados obtidos na Equação 43 e Equação 44 permitem uma interpretação física simples. A força eficaz na excitação de um modo é igual ao trabalho realizado pela força externa

deslocada pela forma modal em questão. Do ponto de vista matemático, o que conseguimos foi separar ou desacoplar, por uma mudança de variáveis, o sistema original de equações diferenciais. Consequentemente, cada uma dessas equações,

orefeq:8.4a e Equação 44, corresponde a um sistema de grau de liberdade único que pode ser escrito como:

$$M_{11} + K_1 z_1 = P_1(t) \quad (45)$$

$$M_{22} + K_2 z_2 = P_2(t) \quad (46)$$

onde:

- $M_1 = m(a_1 + a_2)$ e $M_2 = m_2(a_1 + a_2)$ são as massas modais;
- $K_1 = k(a_1 + a_2)$ e $K_2 = k_2(a_1 + a_2)$ são as constantes modais da mola;
- $P(t) = a_1 F_1(t) + a_2 F_2(t)$ e $P_2(t) = a_2 F_1(t) + a_2 F_2(t)$ são as forças modais.

Alternativamente, se fizermos uso da Equação 47 e Equação 48

$$\phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{a_i^T [M] a_j}} \quad (47)$$

$$\phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n m_k a_{kj}^2}} \quad (48)$$

Essas equações podem ser escritas simplesmente como:

$${}_1 + \omega^2 {}_1 z_1 = P_1(t) \quad (49)$$

$${}_2 + \omega^2 {}_2 z_2 = P_2(t) \quad (50)$$

onde P_1 e P_2 agora são dados por:

$$P_1 = \phi + 11F_1(t) + \phi_{21}F_2(t) \quad (51)$$

$$P_2 = \phi + 12F_1(t) + \phi_{22}F_2(t) \quad (52)$$

A solução para as equações diferenciais desacopladas, Equação 45 e Equação 46 ou equações Equação 49 e Equação 50, pode agora ser encontrada por qualquer um dos métodos para a solução de um sistema de único grau de liberdade.

3 METODOLOGIA

Na sequência deste capítulo será explicitada a metodologia utilizada no trabalho, software utilizado para a modelagem e as análises que foram empregadas.

3.1 SOFTWARE ANSYS

O software Ansys® (2023) é um programa de simulação de engenharia e design 3D que oferece soluções de modelagem de produtos com escalabilidade incomparável e multi-física abrangente. Nesse trabalho iremos utilizar o software para modelagem de uma estrutura de construção civil, que simula uma edificação de pequeno porte. A mesma contém quatro pilares em concreto armado, uma laje maciça de concreto armado, e quatro blocos de fundação periódica 1D composto de borracha e concreto sendo sua base em contato com uma pequena camada de solo. O intuito de do estudo e da modelagem é analisar o quando a fundação periódica em bloco promove o isolamento das vibrações presentes no solo, geradas por cargas rodoviárias.

3.2 MODELO NUMÉRICO

Utilizando o software Ansys® (2023), foi elaborada três modelos, o primeiro, de fundação periódica em blocos, que é o foco principal da pesquisa, e mais dois modelos comparativos, o de fundação periódica tipo radier e o de fundação em concreto tipo bloco. Todos os três modelos contam com um corpo de estrutura atrelados a ele, o qual representa uma edificação de pequeno porte.

Para a geração modelo principal Figura 19, partimos dos seguintes conceitos, primeiro uma estrutura genérica que representasse uma edificação de pequeno porte, que fosse em concreto armado e que tivesse fundação periódica em bloco para cada pilar da edificação. Para simplificar o modelo, e atender nossos requisitos, definimos que a estrutura seria de um pavimento térreo e que a mesma seria composta apenas por quatro pilares com seus respectivos blocos (fundação) e uma laje maciça em concreto armado. A laje possuem uma área $4,84\text{m}^2$ e espessura de 10cm, reforçado com vergalhões de aço com $\varnothing 12,5\text{mm}^2$ na direção x e z, os pilares são quadrado e possuem área de seção transversal de 400cm^2 (20x20cm) e altura de 300cm, todos reforçados com quatro barras de aço de $\varnothing 12,5\text{mm}^2$, conforme Figura 20, os blocos de fundação periódica

1D, compostos de borracha e concreto possuem duas células, sendo elas compostas de 15 cm de concreto e 10 cm de borracha (direção y), se repetindo duas vezes, tendo mais duas dimensões de 80 cm cada (direção x e z), conforme Figura 21.

Para os modelos comparativos, adotou-se o mesmo corpo de edificação alterando então o tipo de fundação, no primeiro modelo comparativo fundação em concreto tipo bloco, cada pilar com seu respectivo bloco, sendo eles com a mesma dimensão de dos blocos periódicos, assim cada bloco de concreto possui 50 cm na direção y, 80 cm na direção x e 80 cm na direção z, conforme Figura 22.

Para o segundo modelo comparativo, utilizamos a fundação periódica 1D tipo radier, a mesma possuem duas células com as mesmas características que a de fundação em bloco periódico, compostas de 15 cm de concreto e 10 cm de borracha (direção y), se repetindo duas vezes, tendo mais duas dimensões de 80 cm cada (direção x e z), a diferença que por ser tipo radier, a fundação é composta por apenas um bloco, como uma laje de piso, as dimensões na direção x e z foram de 280 cm, conforme Figura 23.

O modelo conta também com uma camada de solo, com dimensões de base (eixo x e z) equivalentes a da fundação, tendo como altura (eixo y) 2 cm. Essa camada de solo é pequena e foi incrementada ao modelo, para que funcione como base da estrutura, sendo então o suporte do nossa estrutura e também o elemento que transmitira a excitação a edificação.

Tabela 1 – Resumo detalhado da Estrutura - Fundação Periódica tipo Bloco

Elemento	Material	Dimensão	Quantidade por Elemento
Fundação	Concreto	80 x 80 x 15 cm	2/bloco
	Borracha	80 x 80 x 10 cm	2/bloco
Pilares	Concreto	20 x 20 x 300 cm	1/bloco
	Aço	Ø 12,5mm ²	4/pilar
Laje	Concreto	220 x 220 x 10 cm	1 para toda estrutura
	Aço	Ø 12,5mm ² a cada 20 cm	Na direção x e z da laje

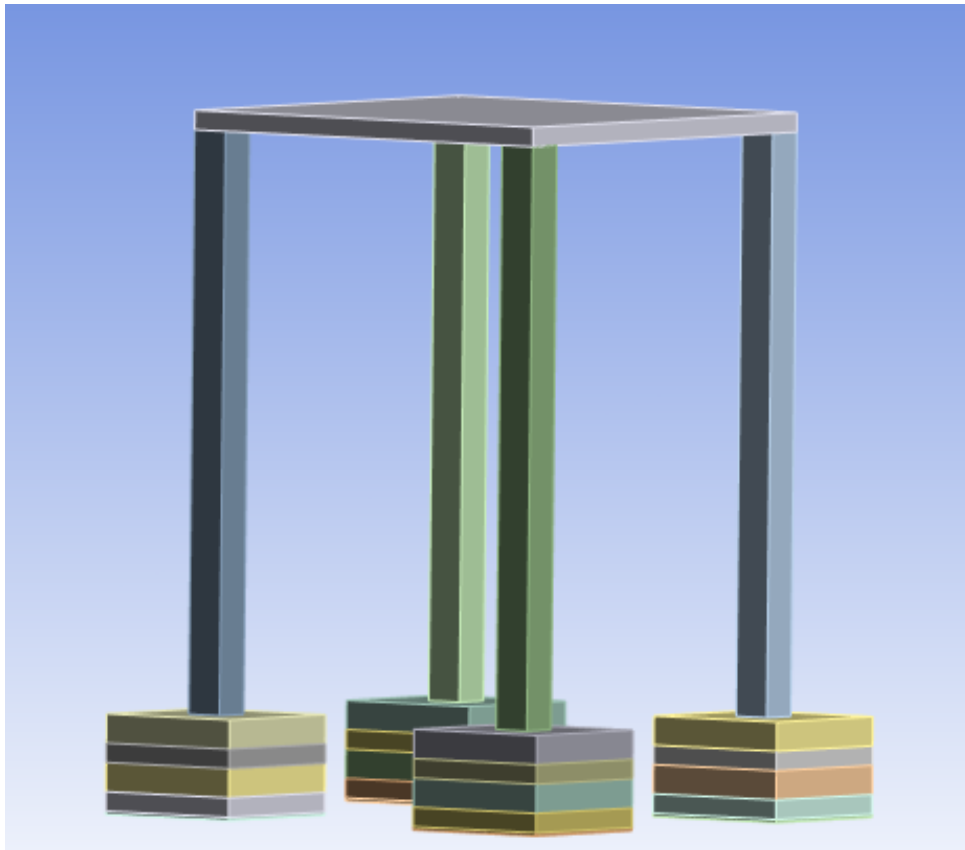
Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 2 – Resumo detalhado da Estrutura - Fundação em Concreto tipo Bloco

Elemento	Material	Dimensão	Quantidade por Elemento
Fundação	Concreto	80 x 80 x 50 cm	1/bloco
Pilares	Concreto	20 x 20 x 300 cm	1/bloco
	Aço	Ø 12,5mm ²	4/pilar
Laje	Concreto	220 x 220 x 10 cm	1 para toda estrutura
	Aço	Ø 12,5mm ² a cada 20 cm	Na direção x e z da laje

Fonte: : Autoria própria (2023)

Figura 19 – Modelo Principal - 3D Ansys



Fonte: Adaptado de Ansys® (2023)

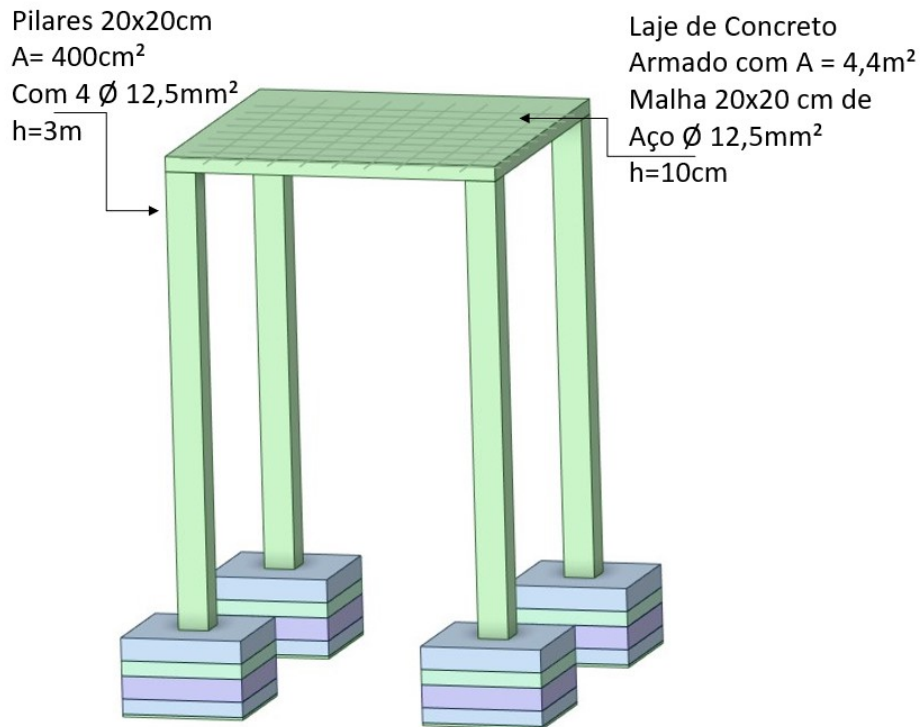
Tabela 3 – Resumo detalhado da Estrutura - Fundação Periódica tipo Radier

Elemento	Material	Dimensão	Quantidade por Elemento
Fundação	Concreto	280 x 280 x 15 cm	2
	Borracha	280 x 280 x 10 cm	2
Pilares	Concreto	20 x 20 x 300 cm	4 para toda estrutura
	Aço	Ø 12,5mm ²	4/pilar
Laje	Concreto	220 x 220 x 10 cm	1 para toda estrutura
	Aço	Ø 12,5mm ² a cada 20 cm	Na direção x e z da laje

Fonte: : Autoria própria (2023)

Para a modelagem dos três modelos numéricos desse trabalho foi utilizados o SpaceClaim do Ansys® (2023), aonde foram atribuídas aos modelos todas as dimensões citadas anteriormente, utilizando de elementos sólidos e elementos de linhas. Para os materiais borracha, concreto e solo foi utilizado elemento sólido 3D, para os vergalhões de aço foi utilizado do elemento linha, então foi atribuído ao elemento linha a uma seção transversal com área circular de 12,5mm². Os elementos linhas em Ansys® (2023) fornecem reforço extra, para elementos sólidos 3D que representam o concreto. As armaduras são convenientemente atribuídas e embutidas automaticamente no concreto por meio da opção Armadura (reforço), na definição de tipo de

Figura 20 – Modelo Numérico da Estrutura - Definido



Fonte: Adaptado de Ansys® (2023)

modelo mostrada Figura 24 (Ansys®, 2023).

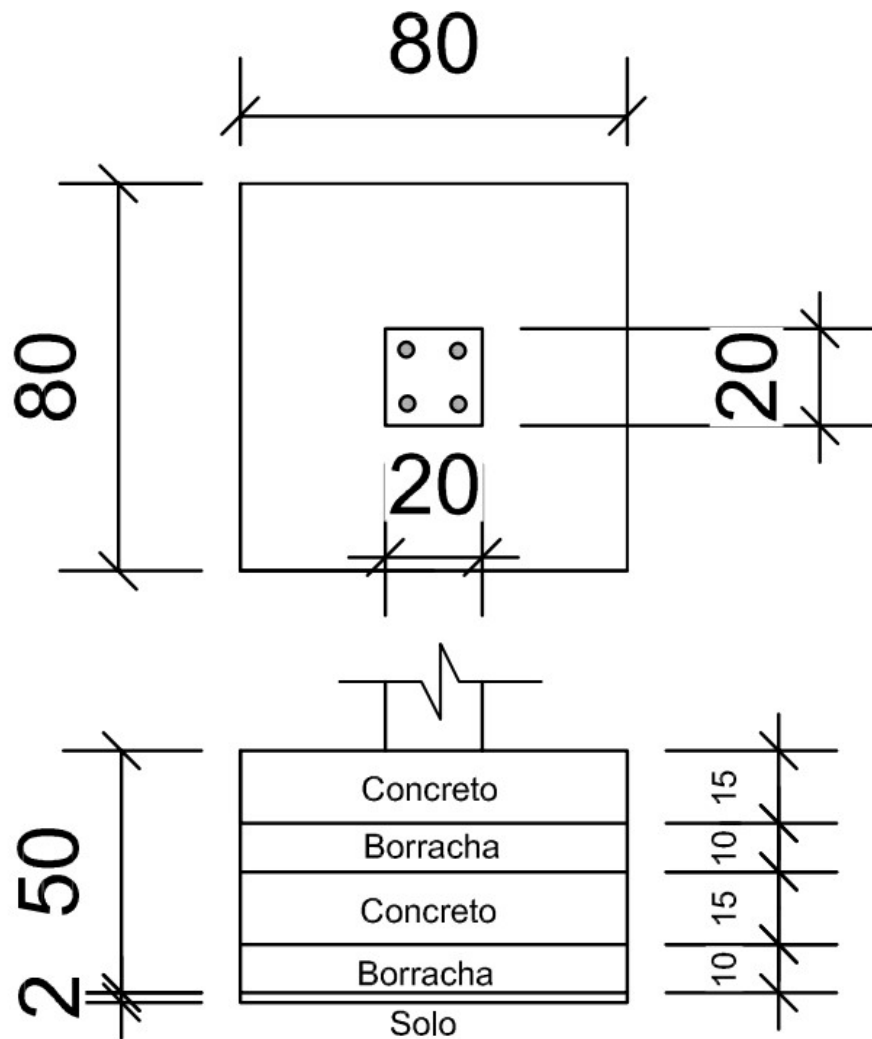
Após a conclusão da modelagem partimos para as atribuições das características de cada geometria. O software Ansys® (2023) possui o Engineering Data, uma biblioteca de matérias, que contém as propriedades de características de diversos matérias, também é possível cadastrar novos materiais com suas propriedades. Para nosso modelo utilizamos as propriedades da biblioteca para as armaduras (vergalhões), apresentado na Tabela 4, já para a borracha, concreto e solo alimentamos o software com as propriedades dos materiais apresentada na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 4 – Propriedades do Material - Aço Vergalhões

Material	Módulo de Young $E(\text{GPa})$	Densidade $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	Coefficiente de Poisson
Structural Steel	200	7850	0,3

Fonte: Ansys® (2023).

Figura 21 – Dimensões fundação periódica tipo bloco



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Tabela 5 – Propriedades do Material - Concreto e Borracha

Material	Módulo de Young E(GPa)	Densidade $\rho(kg/m^3)$	Coefficiente de Poisson
Concreto	25	2300	0,33
Borracha	$1,37 \times 10^{-4}$	1300	0,463

Fonte: Xiong *et al.* (2012).

Tabela 6 – Propriedades do Material - Solo

Material	Módulo de Young E(GPa)	Coefficiente de Poisson
Solo Argiloso	0,02	0,3

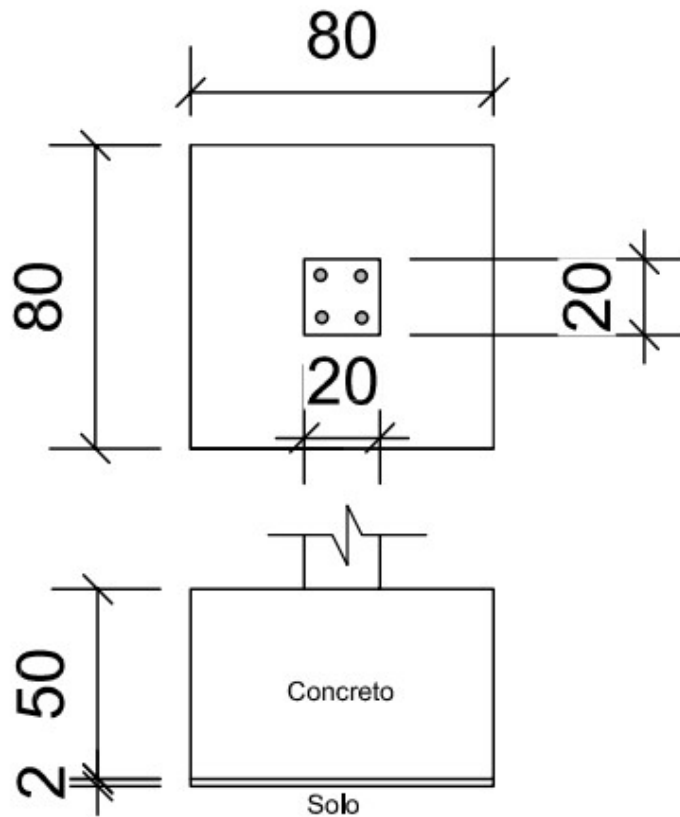
Fonte: Bowles (1996).

Tabela 7 – Propriedades do Material - Solo

Material	Densidade $\rho(kg/m^3)$
Solo Argiloso	1014

Fonte: Scheleder e Lima (2009).

Figura 22 – Dimensões fundação de concreto tipo bloco

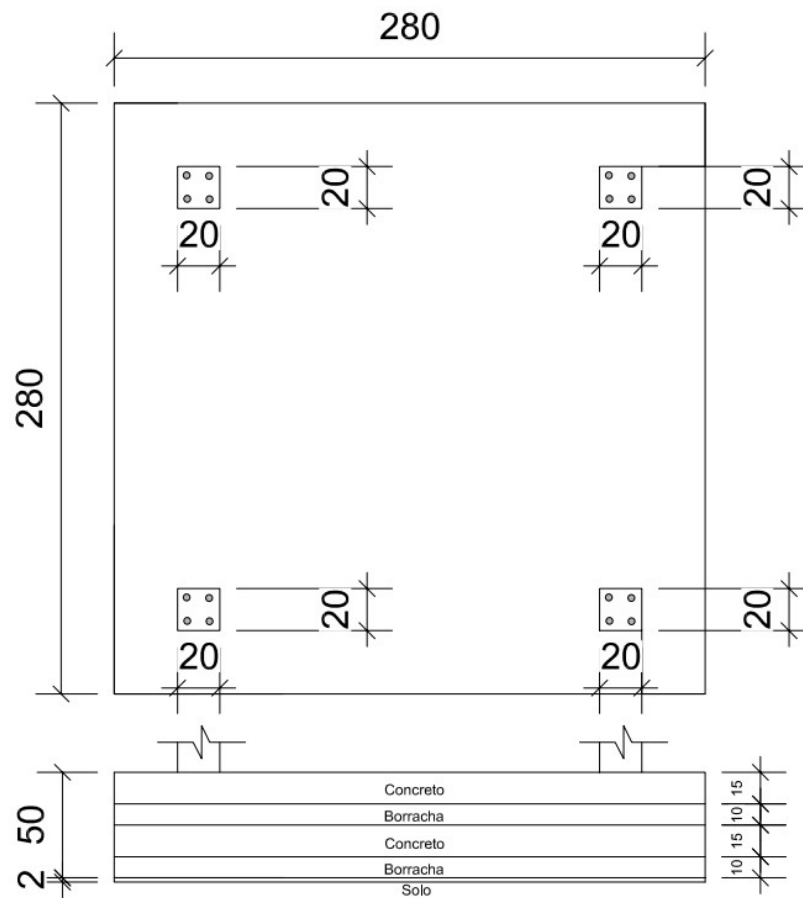


Fonte: Autoria Própria, 2023.

3.2.1 Refinamento de Malha

Com o intuito de obter o melhor resultado das nossas análises, realizamos o refinamento da malha utilizando a análise modal do software Ansys® (2023), para isso definimos nossa frequência máxima de interesse. A vibração resultante tráfego terrestre, rodoviário e ferroviário tende a gerar ondas no solo com frequências que se situam entre 1 Hz e 80 Hz. Embora esses intervalos sejam extremos, eles representam os valores possíveis que podem necessitar ser medidos. Valores de vibração contidos dentro dessas faixas podem levantar preocupações (ISO-4866, 1990). Outras pesquisas apontam que o tráfego rodoviário tende a produzir vibrações com frequências predominantemente na faixa de 5 a 25 Hz (oscilações por segundo) (HUNAIDI, 2000). A pesquisa Zolina e Kupchikova (2019) aponta que durante o dia nas bandas de oitava com frequências médias geométricas de 8, 16, 31,5 e 63 Hz há um excesso de valores de vibração permitido, sendo o mais crítico é a faixa de frequência de 16 a 63 Hz. Portanto, essa pesquisa tenta analisar vibrações induzidas pelo fluxo de cargas do tráfego rodoviário, na faixa de

Figura 23 – Dimensões fundação periódica tipo radier



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Figura 24 – Dimensões fundação periódica tipo radier

Details of "SYS\Beam (Circle)"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Model Type	Reinforcement
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Cross Section	Circle
- Material	
<input type="checkbox"/> Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes

Fonte: Adaptado de Ansys® (2023).

1-50Hz.

Porém ao realizarmos as análises modal, para nosso modelo periódico, notamos que o mesmo, necessitava de muitos modos para chegar a faixa de 50 Hz. Portanto para o refinamento da malha, foi utilizado o modelo numérico de fundação periódico tipo bloco, com faixa de

frequência de 25 Hz.

Partindo disso, analisamos sete malhas, com diferentes dimensões de elementos predominantemente quadriláteros, para a faixa de 25 Hz. A primeira com elementos na laje, pilares e fundação com dimensões de 100mm, a segunda com laje, pilares e fundação com dimensões de 75mm, a terceira com laje, pilares e fundação com dimensões de 50mm, quarta malha com laje e pilares com elementos com dimensão de 50mm e fundação com elementos de 45mm, a quinta malha com laje e pilares com elementos de 50mm e fundação com elementos de 40mm, sexta malha com laje e pilares com elementos de 50mm e fundação com elementos de 35mm e a sétima malha com laje e pilares com elementos de 50mm e fundação com elementos de 30mm, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Dimensões das Malhas

Malha	Elemento da Estrutura	Dimensões (mm)
1	Laje	100
	Pilares	100
	Fundação	100
2	Laje	75
	Pilares	75
	Fundação	75
3	Laje	50
	Pilares	50
	Fundação	50
4	Laje	50
	Pilares	50
	Fundação	45
5	Laje	50
	Pilares	50
	Fundação	40
6	Laje	50
	Pilares	50
	Fundação	35
7	Laje	50
	Pilares	50
	Fundação	30

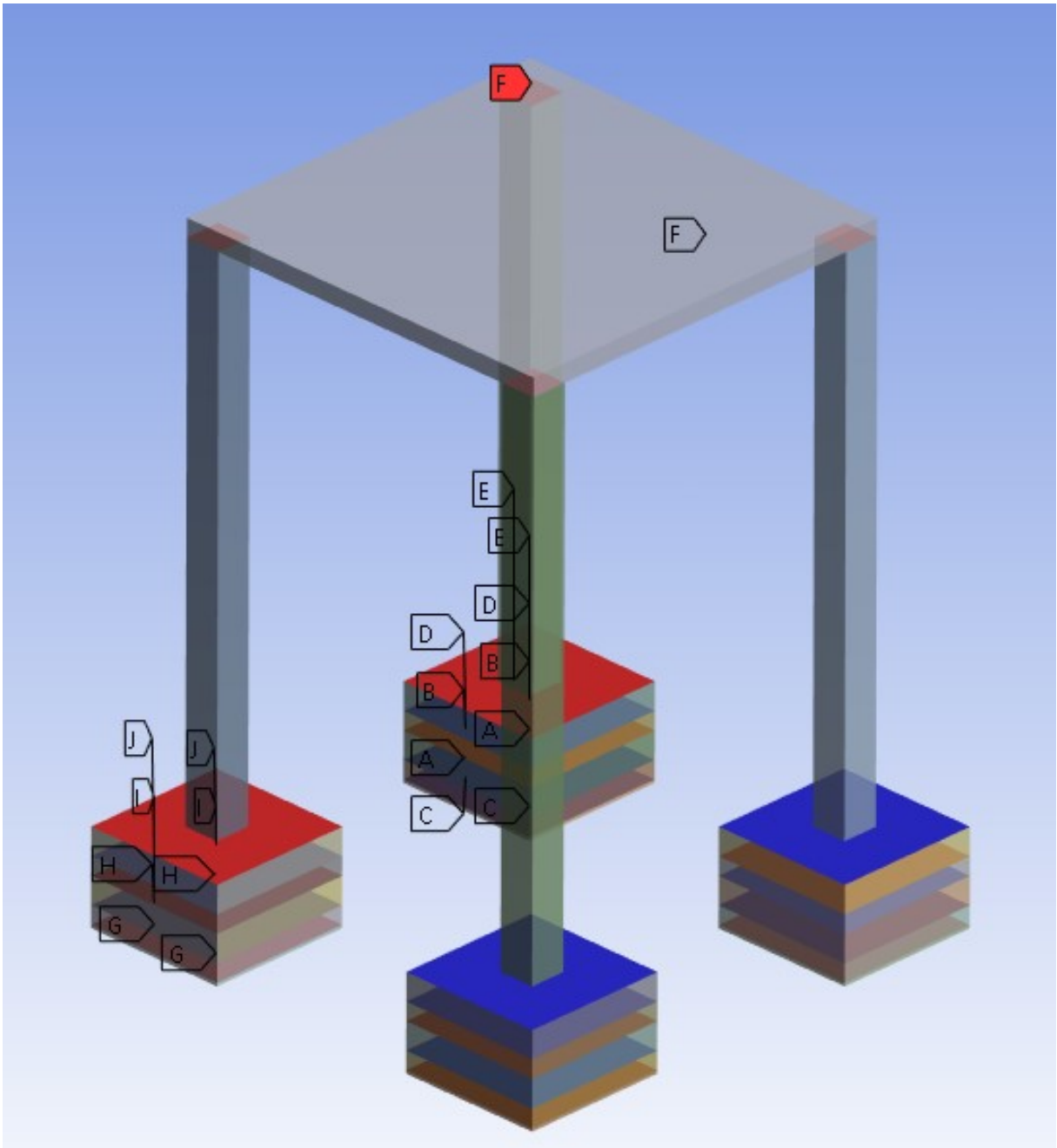
Fonte: Autoria Própria (2023).

3.2.2 Condições de Contorno

As condições de contorno aplicadas para descrever o comportamento do modelo numérico, foram definidas para aproximar a simulação dos casos reais. Para simular nossa estrutura conforme a realidade utilizamos o contato Bounded para fazer a ligação entre todos os materiais,

sendo assim todos os materiais sólidos foram ligados por suas fases de contato utilizando o contato Bounded, Figura 25. Os elementos de linha (vergalhões), conforme já dito anteriormente neste capítulo, eles foram atribuídos como armadura de reforço ao concreto, sendo então embutidas automaticamente no concreto, fazendo com que o programa entenda que tratasse de concreto armado e que as barras de aço encontrasse aderidas ao elemento pilar e laje.

Figura 25 – Contato Tipo Bounded



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.2.3 Análise Modal

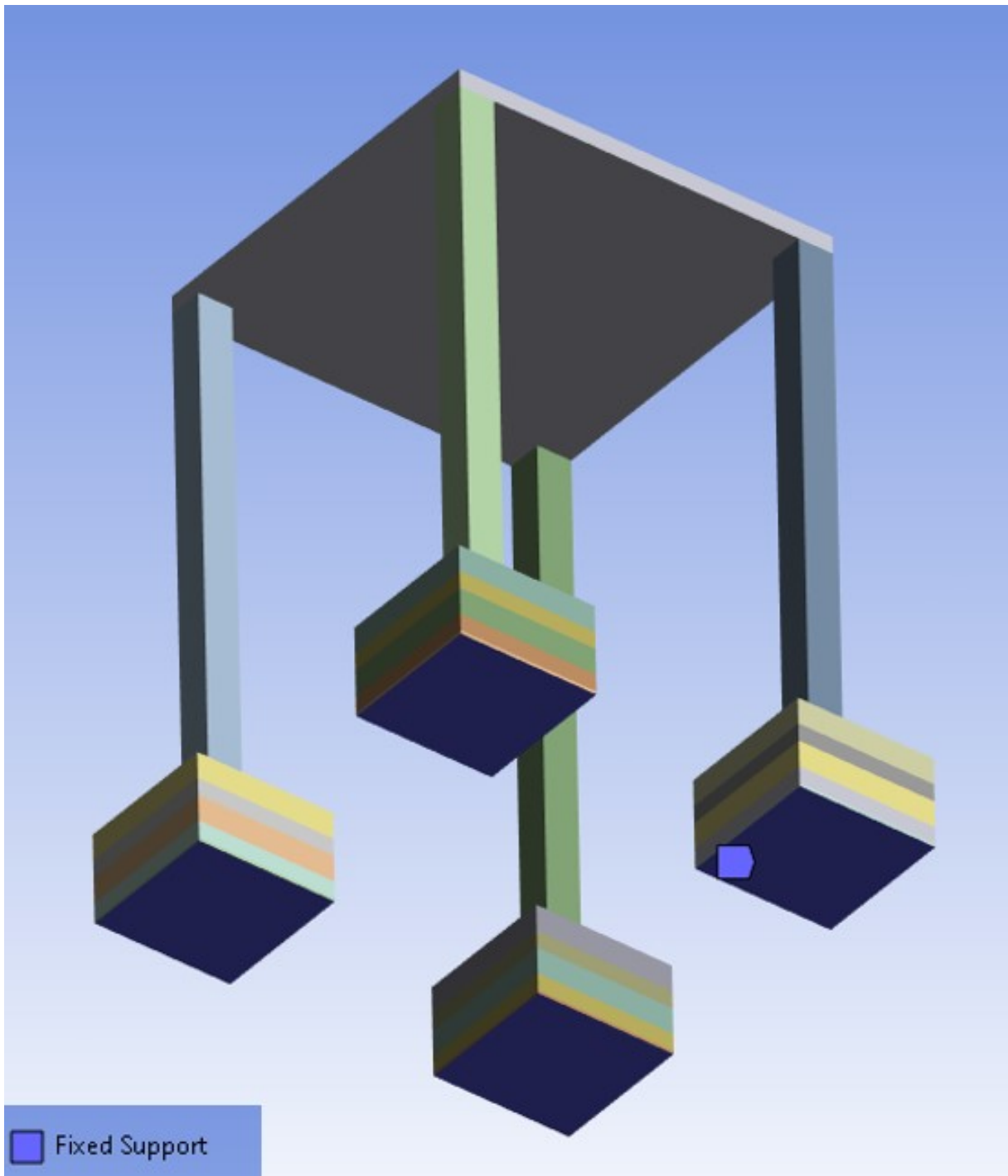
Com nosso modelo numérico definido com as condições de contorno e malha apropriada para as análises. Partimos da análise modal, aonde primeiramente definimos o suporte fixo, sendo as quatro faces da base do elemento solo para os modelos com fundação em bloco, Figura 26, para fundação em radier o suporte fixo, é a face da base do solo conforme Figura 27. Foram, então, conduzidas as análises para os três modelos, considerando um máximo de 100 modos.

3.2.4 Análise Harmônica

Para a análise harmônica, foi utilizado método de superposição modal, pois nosso estudo pretende analisar o comportamento da estrutura devido a excitação de base da estrutura. Método da superposição modal por meio de uma combinação linear de formas de modo, determina o vetor de deslocamento da estrutura. Utilizando essa técnica, o software Ansys® (2023) determina a resposta da estrutura em uma faixa de frequência. Neste caso, a resposta geral depende dos modos que estão sendo considerados. Assim, com base na análise modal, realizamos a análise harmônica para os três modelos, utilizando duas acelerações distintas, conforme apresentado na Tabela 9. Para nossa análise, optamos por utilizar o comando Cluster Results, conforme apresentado na Figura 28. Esse comando aproxima os pontos de solução para frequências iguais ou próximas às frequências naturais, assim analisamos quais frequências naturais tem maior influencia no comportamento da estrutura. Definimos o número de Clusters com um valor de 10 intervalos. Quanto maior esse valor, maior o número de iterações e mais precisa a análise. Entretanto, também é importante notar que quanto maior o número de intervalos, maior será o esforço computacional necessário.

Hunaidi (2000) as ondas Rayleigh, que são as principais portadoras das vibrações do tráfego, encontrasse em uma região próxima à superfície do solo, o movimento do solo induzido por essas ondas tem componentes horizontais e verticais, que diminuem com a profundidade.

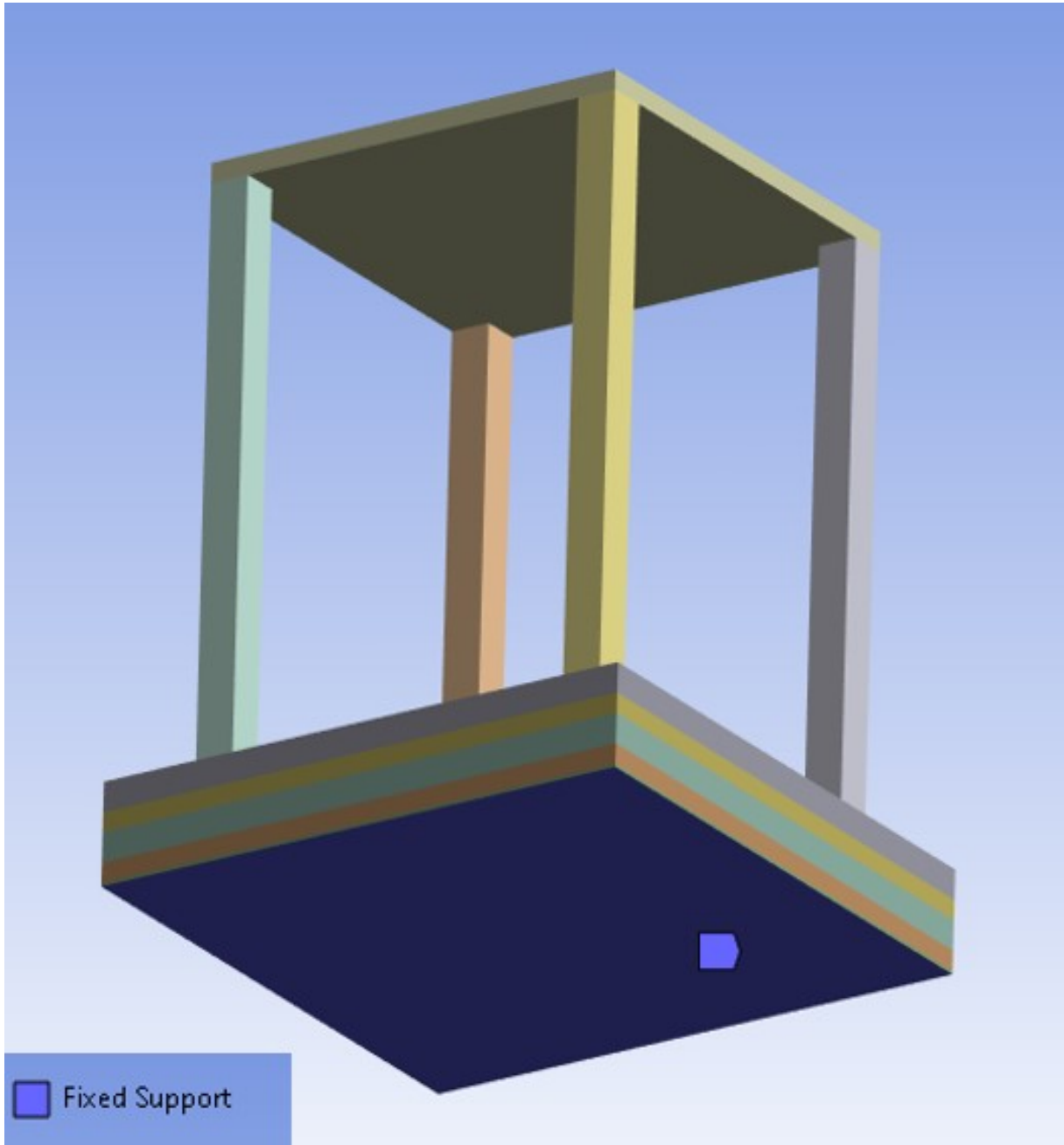
Para nossa análise, aplicamos as acelerações como excitações de base (Figura 29), as acelerações como componentes horizontais e verticais (nas direções x e y), com o intuito de simular a chegada de ondas rayleigh nas fundação, as acelerações foram aplicadas simultaneamente, para os três modelos numéricos, como mostrado em Figura 30. Para cada aceleração apresentada na Tabela 9 foi realizado uma simulação, por exemplo, para a aceleração de 30,9 mm/s², gerada por um onibus à 50 km/h, foi aplicado como excitação na base da fundação a

Figura 26 – Suporte Fixo Fundação tipo Bloco

Fonte: Autoria Própria (2023)

aceleração de $30,9 \text{ mm/s}^2$ como entrada vertical aplicada no eixo y, e como entrada horizontal aplicamos a aceleração de $30,9 \text{ mm/s}^2$ a aceleração no eixo x. As respostas medidas devida as excitações de base aplicadas, foram medidas na base e no topo do pilar conforme Figura 31. As respostas analisadas, foram deformações direcionais, nos eixos em que as excitações foram aplicadas.

Figura 27 – Suporte Fixo Fundação tipo Radier



Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 9 – Aceleração mm/s^2 na parede da Fundação induzidas por um ônibus e um caminhão

Veiculo	velocidade (Km/h)	Aceleração (mm/s^2)
Ônibus	50	30,9
Caminhão	50	15,7

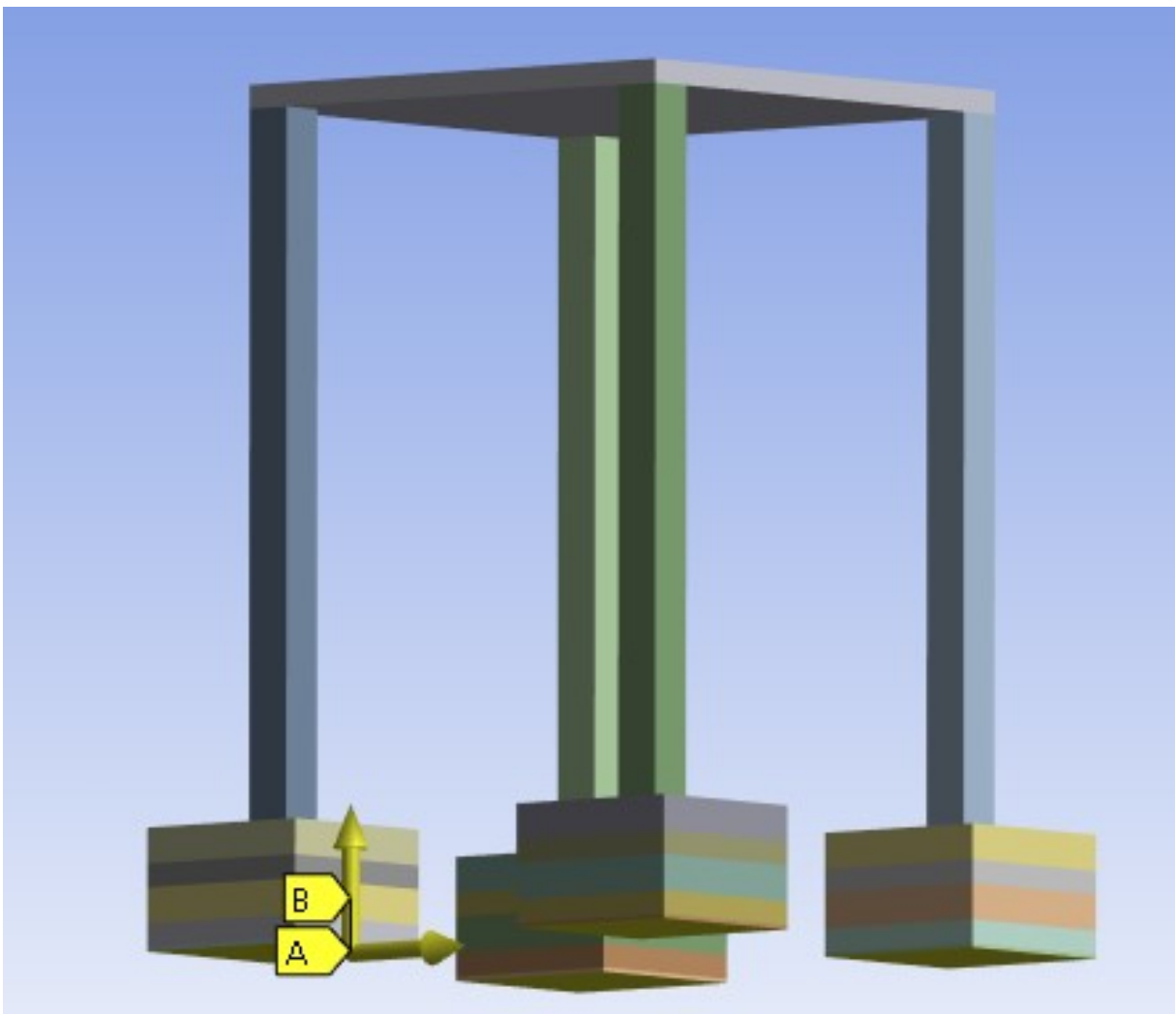
Fonte: Hunaidi (2000).

Figura 28 – Configuração de Análise Harmônica

Options	
Frequency Spacing	Linear
<input type="checkbox"/> Range Minimum	0, Hz
<input type="checkbox"/> Range Maximum	100, Hz
Cluster Number	10
User Defined Frequencies	Off
Solution Method	Mode Superposition
Include Residual Vector	No
Cluster Results	Yes
Modal Frequency Range	Program Controlled
On Demand Expansion Option	Program Controlled
-- On Demand Expansion	No
Store Results At All Frequencies	Yes

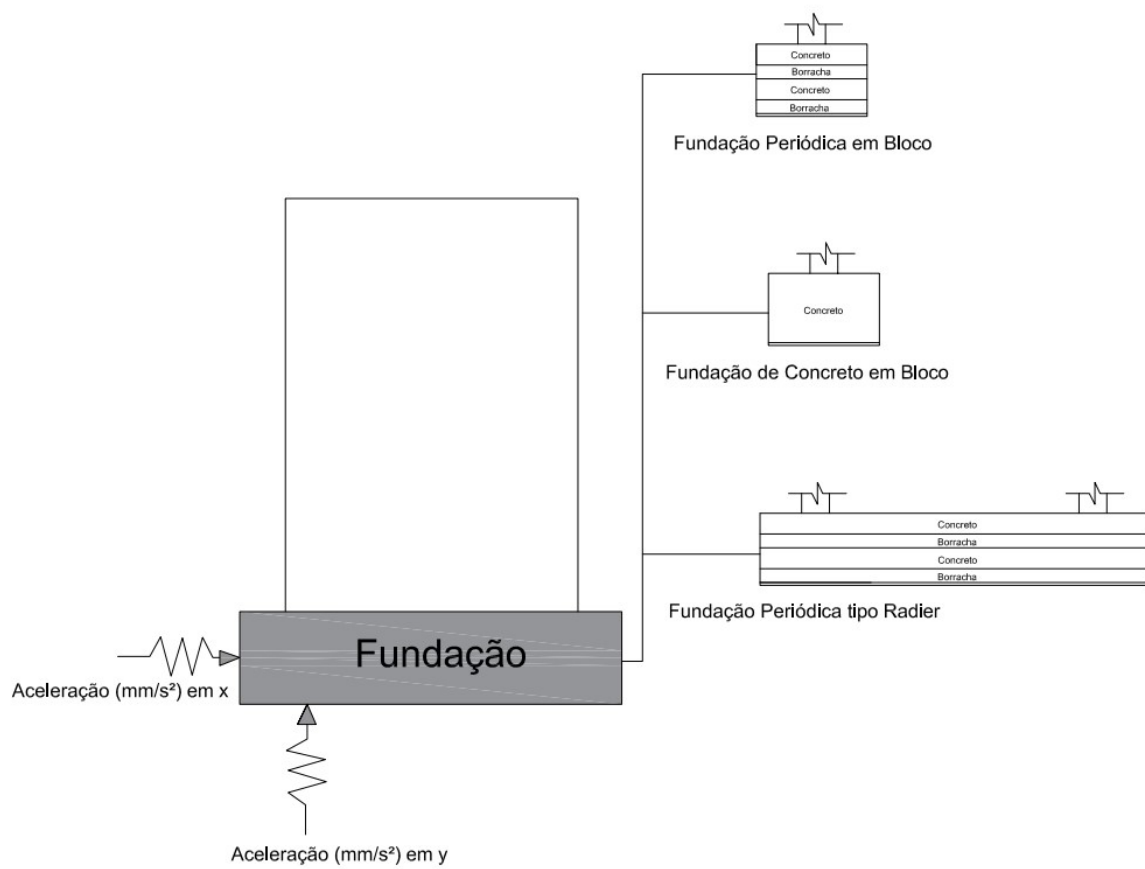
Fonte: Adaptado de Ansys® (2023).

Figura 29 – Excitação Pela Base



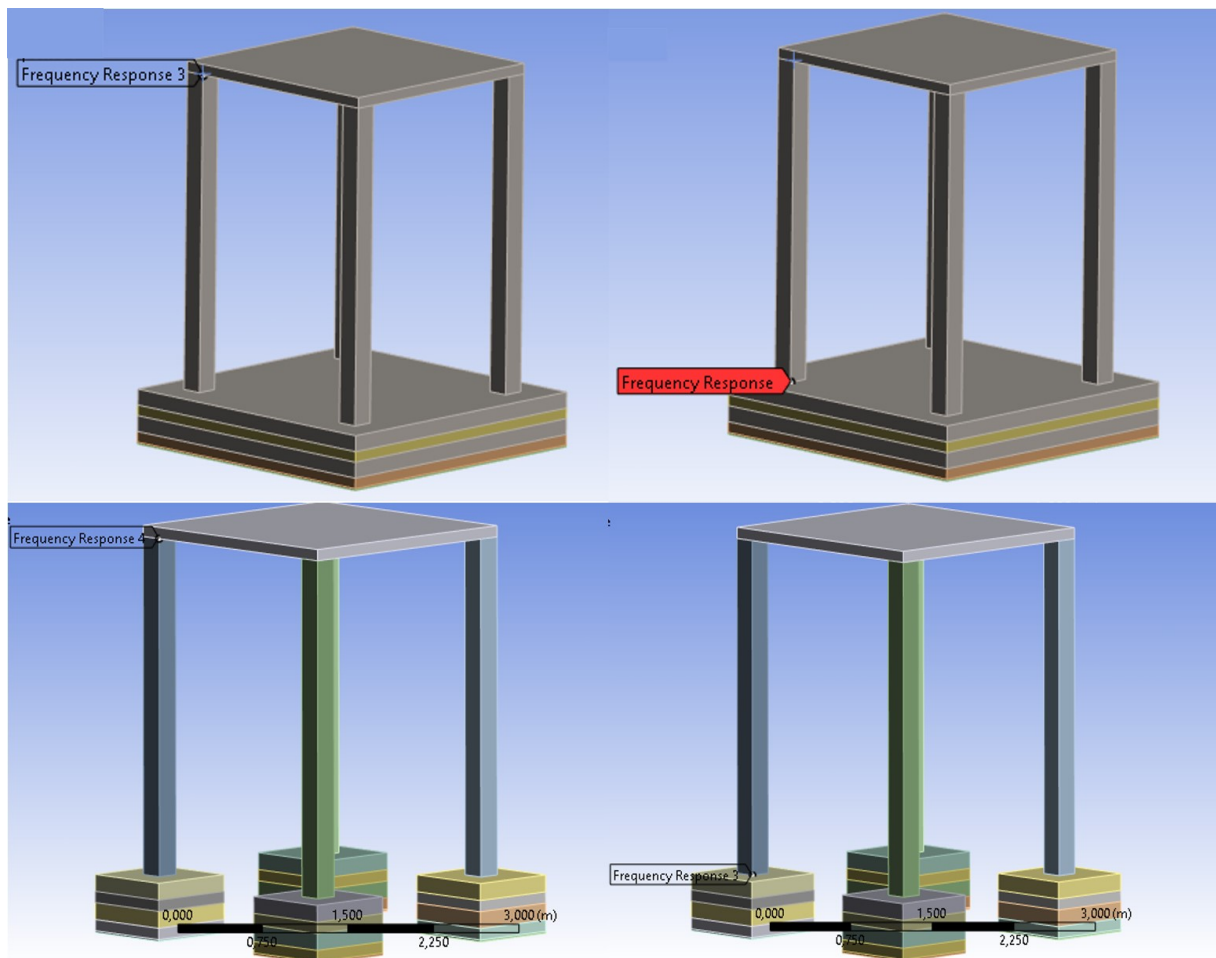
Fonte: Adaptado de Ansys® (2023).

Figura 30 – Modelos Analisado por Excitação de Base



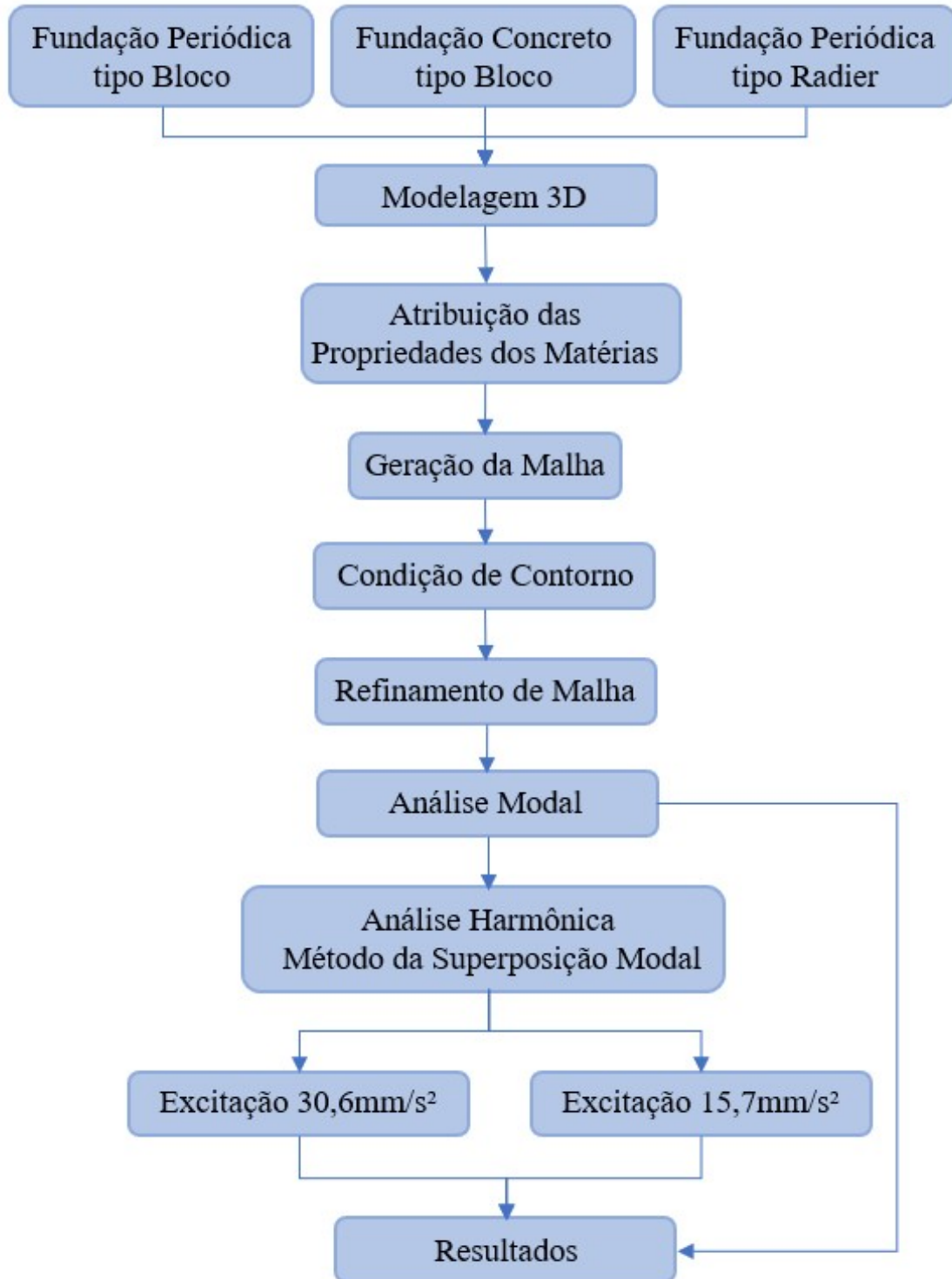
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 31 – Ponto de Resposta Análise Harmônica



Fonte: Adaptado de Ansys® (2023).

Figura 32 – Fluxograma



Fonte: Autoria Própria (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentadas o percurso de soluções e comparações de resultados até se atingir o objetivo final do estudo, o mesmo pretende analisar o comportamento dos três modelos de fundação ao aplicar a aceleração induzida pelo tráfego rodoviário, fim de verificar seu isolamento de vibração.

Para isso foram realizadas duas análises, a primeira sendo a análise modal, na qual obtivemos os modos de frequência natural da estrutura, para os diferentes modelos. Nossa segunda análise, foi a análise no domínio da frequência, a qual obtivemos resposta da frequência para a deformação da estrutura, para cada modelo, e aceleração aplicada, a fim de identificar em quais frequência encontrasse os picos de amplitude de ressonância.

4.1 REFINAMENTO DE MALHA

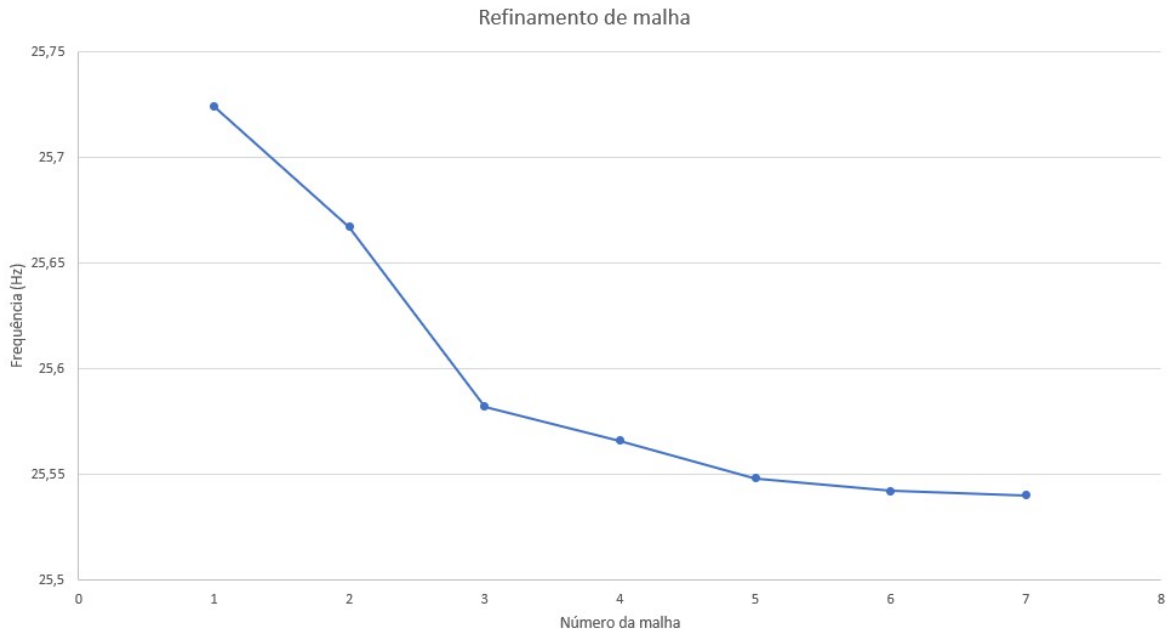
Foram realizados a análise modal do modelo numérico da fundação periódica tipo bloco, para diferentes malhas, na frequência de 25 Hz. Observou-se que a partir da quinta iteração da malha, os valores passaram a exibir uma tendência de convergência, conforme Figura 33. Assim definimos a sexta malha, para utilizar nas análises. Na Tabela 10, estão apresentadas as estatísticas referentes à sexta da malha, para cada modelo numérico. Além disso, na Figura 34 e Figura 35, é possível visualizar o formato dos elementos das predominantes nas malhas.

Tabela 10 – Dimensões e Qualidade das Malhas

Modelo Numérico	Numero de Nós	Numero de Elementos	Qualidade da Malha	
			Média	Desvio Padrão
Fundação Periódica tipo Bloco	212040	40282	0,98555	5,1251e-002
Fundação de Concreto tipo Bloco	212040	40282	0,98555	5,1251e-002
Fundação Periódica tipo Radier	668516	305993	0,88136	0,10241

Fonte: Autoria Própria (2023).

A Tabela 10, além das estatísticas das malhas, apresenta também a qualidade dos elementos da malha, o qual fornece dois parâmetros importantes, a qualidade média dos elementos, que é desejável que se encontre próximo a 1, e também o desvio padrão que é ideal que esteja próximo de 0, esses parâmetros são obtidos diretamente no software Ansys® (2023).

Figura 33 – Gráfico Refinamento de Malha

Fonte: Autoria Própria (2023).

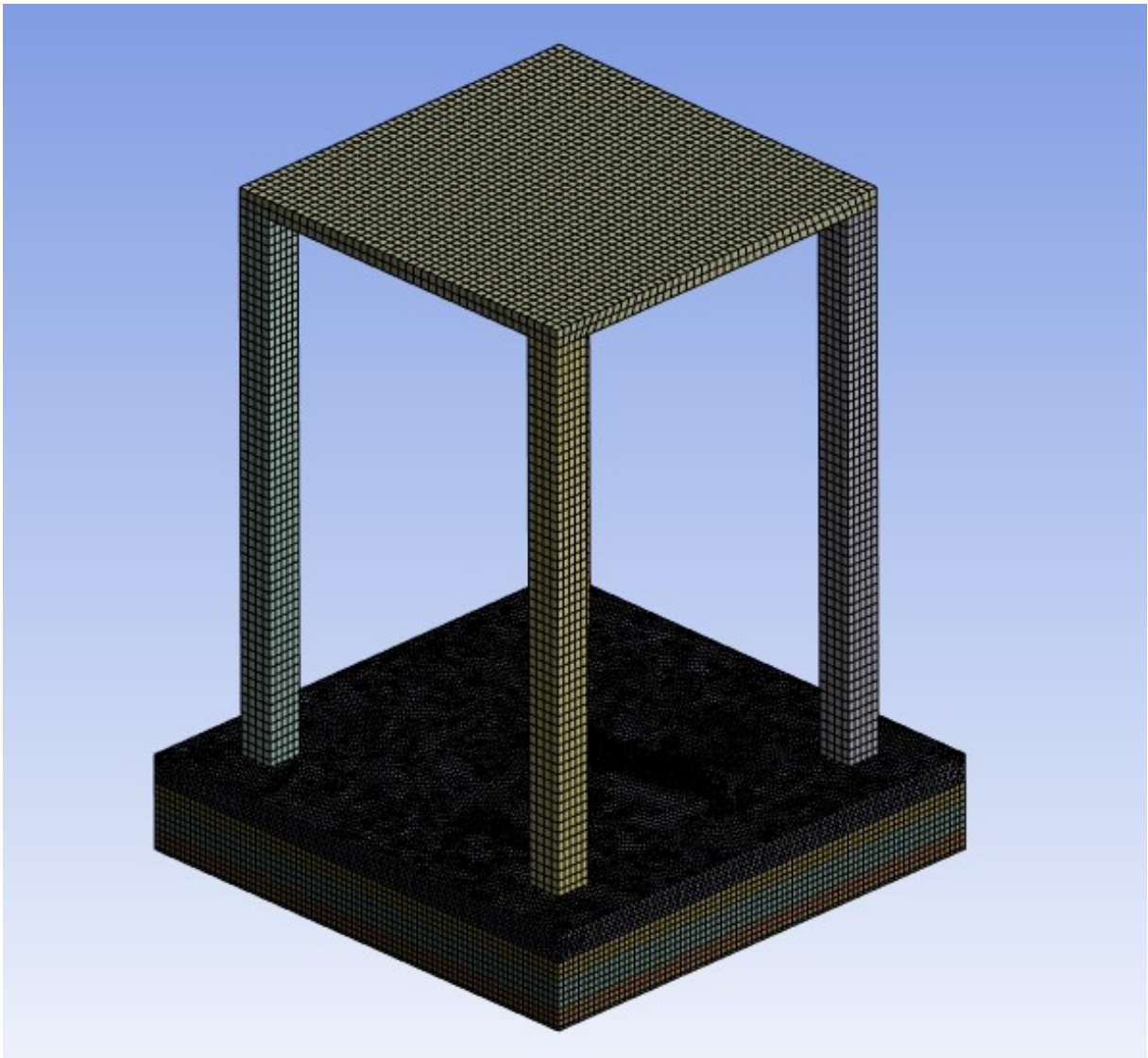
4.2 ANÁLISE MODAL

A fim de compreender o comportamento dinâmico de nossa estrutura e sua influência na edificação ao utilizarmos diferentes tipos de fundações, realizamos a análise modal para as três estruturas apresentadas neste trabalho: edificação com fundação periódica tipo bloco, edificação com fundação em concreto tipo bloco e edificação com fundação periódica tipo radier.

Conforme descrito no capítulo anterior, primeiramente definimos o modelo numérico, incluindo suas geometrias respectivas, propriedades dos materiais empregados e condições de contorno para a estrutura. Atribuímos também um suporte fixo à estrutura. Levando tudo isso em consideração o software Além disso, determinamos a frequência de interesse e com base nisso definimos o número máximo de modos a serem encontrados. Após essa etapa, conduzimos as análises para as três estruturas.

A estrutura com fundação periódica tipo bloco, apresentou $f=1,539\text{Hz}$ no primeiro modo, $f=1,5394\text{Hz}$ no segundo modo, $f=2,0591\text{Hz}$ no terceiro modo e $f=3,9459\text{Hz}$ no quarto modo, conforme Figura 36. Para a estrutura com fundação em concreto tipo bloco, a análise modal apresentou $f=7,3166\text{Hz}$ para o primeiro modo, $f=7,3205\text{Hz}$ para o segundo modo, $f=11,649\text{Hz}$ para o terceiro modo e $f=36,713\text{Hz}$ para o quarto modo, apresentado na Figura 37. Na estrutura com fundação periódica tipo radier encontrou-se $f=2,372\text{Hz}$ no primeiro modo, $f=2,3727\text{Hz}$ no segundo modo, $f=2,6119\text{Hz}$ no terceiro modo, $f=4,7186\text{Hz}$ no quarto modo, conforme

Figura 34 – Malha Modelo Numérico Fundação Periódica tipo Radier



Fonte: Autoria Própria (2023).

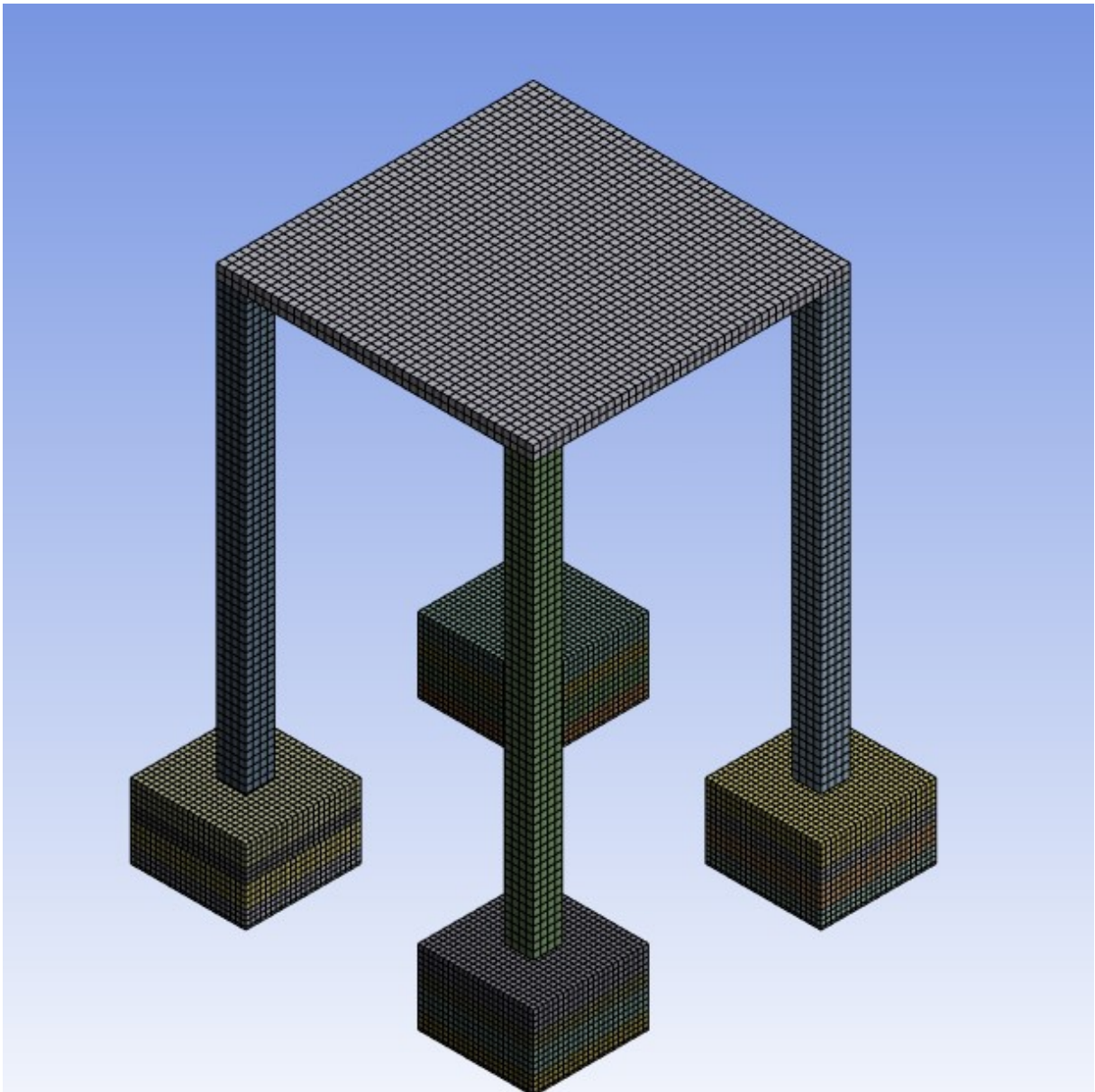
Figura 38. Na Tabela 11 estão apresentados os 10 modos de vibração para cada estrutura. Para compreendermos melhor a diferença do comportamento de cada estrutura, podemos visualizar na Figura 39 o a frequência natural das três estruturas em gráfico de colunas.

Tabela 11 – Módulos de Frequência Natural para as três modelos de estruturas.

Módulo	Fundação Periódica tipo Bloco (Hz)	Fundação em Concreto tipo Bloco (Hz)	Fundação Periódica tipo Radier (Hz)
1	1,5391	7,3166	2,3739
2	1,5394	7,3205	2,374
3	2,0591	11,649	2,6138
4	3,9459	36,713	4,7193
5	4,0048	44,934	4,7193
6	4,0113	45,484	7,9358
7	4,0118	45,498	8,7751
8	4,0184	49,369	8,7753
9	4,1652	51,593	9,4852
10	4,1658	51,6	14,659

Fonte: : Autoria própria (2023).

Figura 35 – Malha Modelo Numérico Fudançação Periódica e de Concreto tipo Bloco

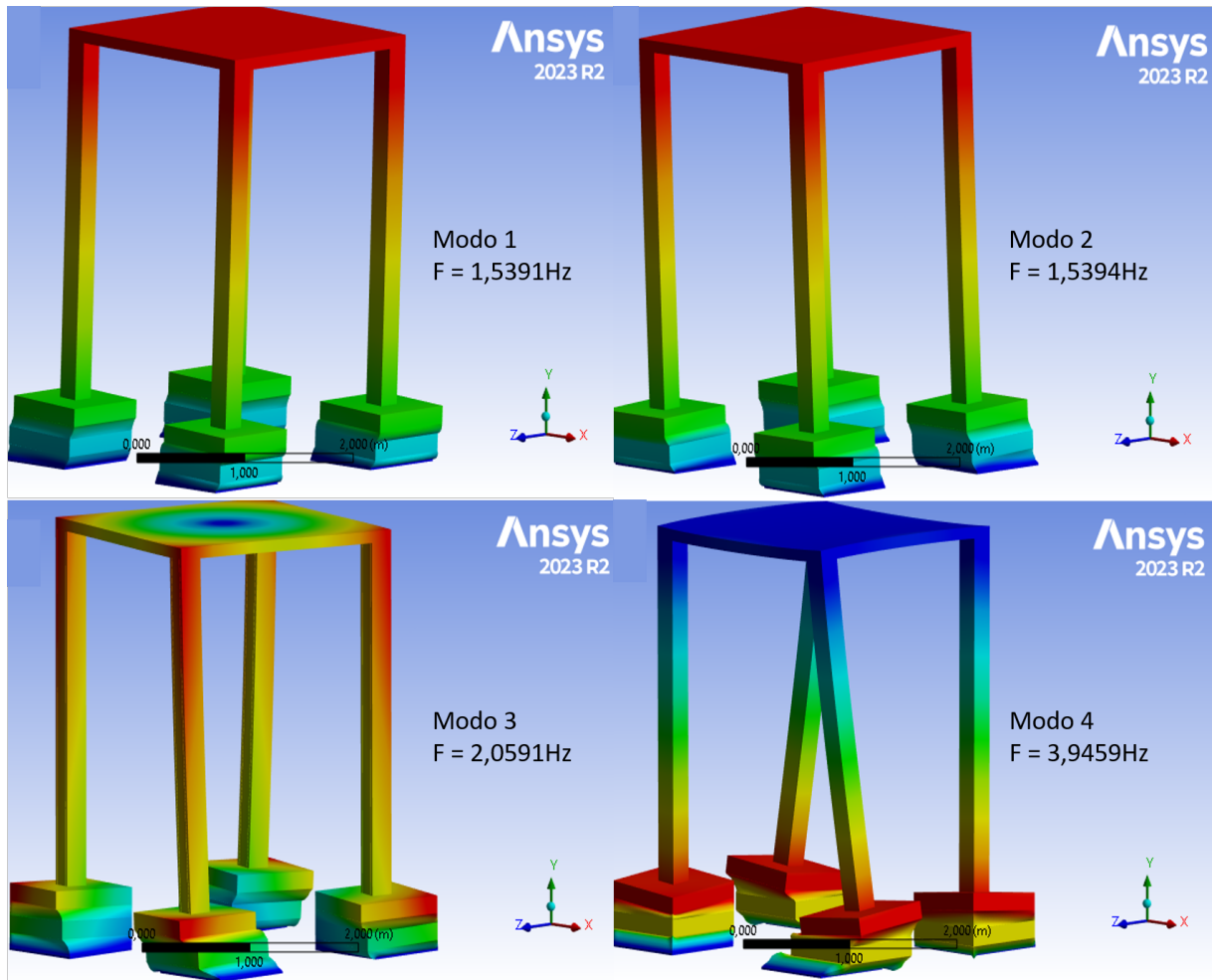


Fonte: Aatoria Própria (2023).

Os resultados obtidos através da análise modal foram derivados da consideração da geometria, propriedades dos materiais e condições de contorno implementadas no modelo numérico. Ao analisarmos esses resultados, é evidente o impacto do material borracha na estrutura, resultando em frequências naturais mais baixas em comparação com a estrutura que possui uma fundação de concreto.

Além disso, a influência da geometria da fundação é observável, a estrutura com uma fundação periódica em radier apresenta modos de frequência natural mais elevados do que a fundação periódica em bloco. Outro ponto observado é o comportamento da estrutura no quarto modo. Pode-se visualizar que a estrutura com fundação periódica em bloco exibe uma

Figura 36 – Frequências Naturais dos Quartos primeiros modo de Vibração da Estrutura Com Fundação Periódica tipo Bloco



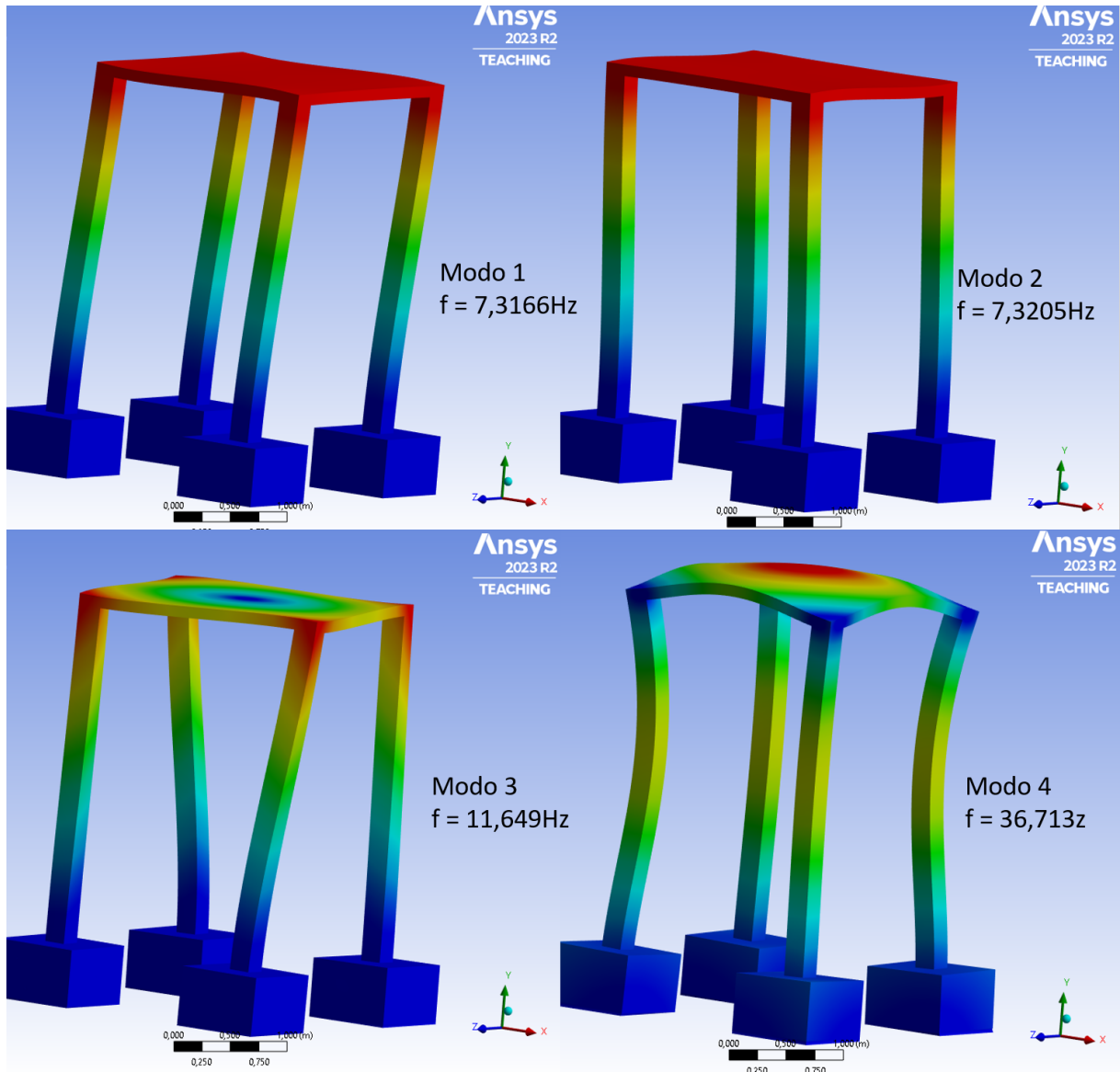
Fonte: Autoria Própria (2023).

deformação mínima na laje, o que nos mostra indícios da influência e benefício da utilização desse modelo de fundação para isolamento vibracional da estrutura.

Uma questão que gera preocupação é a possibilidade de que a redução excessiva da frequência natural resulte em coincidências com frequências baixas que correspondente as cargas de utilização comuns em edificações. De acordo com (PUC-RIO, 2023b), as frequências associadas ao movimento de pessoas caminhando estão situadas nos intervalos de 1,6-2,2 Hz, 3,2-4,4 Hz, 4,8-6,6 Hz e 6,4-8,8 Hz. Vemos que nosso primeiro e segundo modo ainda possui frequência natural mais baixas, do que a frequência de excitação que esse tipo de carregamento gera. Essas frequências de excitação são provenientes de forças harmônicas levando em consideração a faixa de peso, observamos que os próximas três frequências de excitação geradas por esses harmônicos, encontrasse nas lacunas das frequências natural das três estruturas analisadas.

Segundo Zhao *et al.* (2021), as diferentes bandas de *gaps* criadas em uma fundação periódica de diferentes camadas, é capaz de absorver/dissipar a energia transmitida pelo solo,

Figura 37 – Frequências Naturais dos Quartos primeiros modo de Vibração da Estrutura Com Fundação em Concreto tipo Bloco

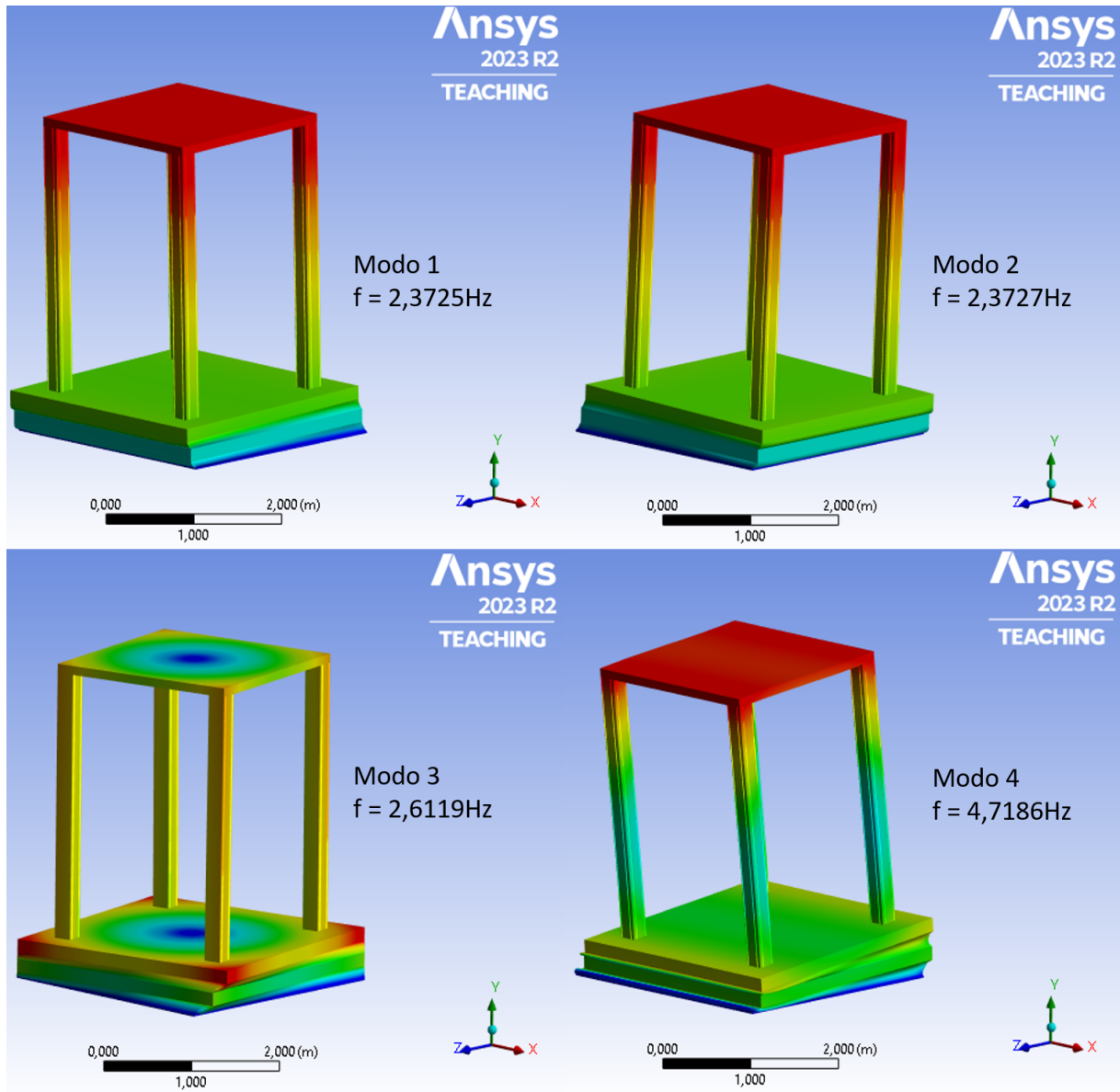


Fonte: Autoria Própria (2023).

provenientes de terremotos e outras vibrações. A combinação dos polímeros, com concreto exibem características únicas de gap de banda, as ondas elásticas podem ser filtradas e não podem continuar a se propagar através da estrutura quando a frequência predominante cai dentro dos gaps de banda de frequência. Xiong *et al.* (2012) as fundações periódicas podem reduzir muito a resposta dinâmica das estruturas superiores sob movimento vertical e longitudinal do solo.

Para entendermos melhor o comportamento dessas estruturas, partimos para o resultado das análises no domínio da frequência, na nossa faixa de frequência de interesse.

Figura 38 – Frequências Naturais dos Quartos primeiros modo de Vibração da Estrutura Com Fundação Periódica tipo Radier

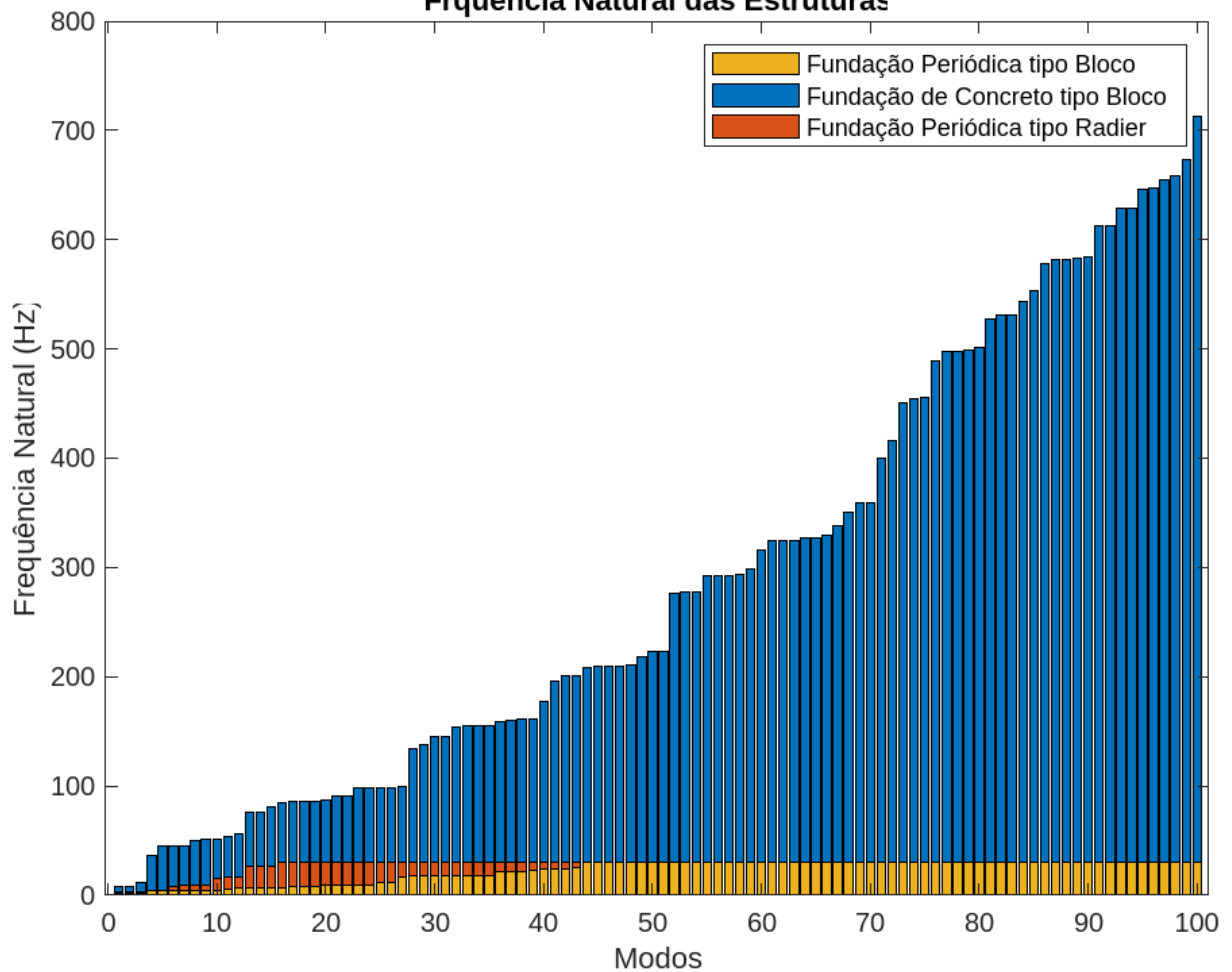


Fonte: Autoria Própria (2023).

4.3 ANÁLISE HARMÔNICA

As vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário são uma preocupação comum nas cidades do mundo. Proprietários de casas podem reclamar de aborrecimento e danos à construção. Pode haver preocupação com a possibilidade de efeitos adversos a longo prazo das vibrações em edifícios históricos, especialmente aqueles em condições precárias. Como a maioria dos problemas de vibração, as vibrações do tráfego podem ser caracterizadas por um cenário fonte-caminho-receptor. O contato do veículo com irregularidades na superfície da estrada, por exemplo, buracos, rachaduras e tampas de bueiros irregulares, induz cargas dinâmicas no pavimento. Essas

Figura 39 – Gráfico de Colunas - Frequência Natural do Modelos de Estudo
Frequência Natural das Estruturas



Fonte: Autoria Própria (2023).

cargas geram estresse ondas, que se propagam no solo, eventualmente atingindo as fundações de edifícios adjacentes e fazendo com que eles vibrem (HUNAIDI, 2000).

As vibrações do tráfego são causadas principalmente por veículos pesados, como ônibus e caminhões. Carros de passeio e caminhões leves raramente induzem vibrações perceptíveis nos edifícios (HUNAIDI, 2000).

Segundo Hunaidi (2000) é difícil uma relação simples quando um ônibus ou um caminhão atinge uma irregularidade na pista de rolagem. A irregularidade longitudinal de estradas, faz com que o rolamento por essas vias gere cargas de impacto e sendo elas cargas oscilantes devido ao "salto do eixo" do veículo (HUNAIDI, 2000).

Essas cargas de impacto acaba por gerar gera vibrações, gerando ondas que se propagam pelo solo até se dissiparem, mas nesse caminho podem encontrar estruturas, como fundações e repassar essas cargas.

As ondas Rayleigh, que são as principais portadoras das vibrações do tráfego, estão

confinadas a uma região perto da superfície do solo que tem aproximadamente um comprimento de onda de profundidade. O movimento do solo induzido por essas ondas tem componentes horizontais e verticais, que diminuem com a profundidade (HUNAIDI, 2000).

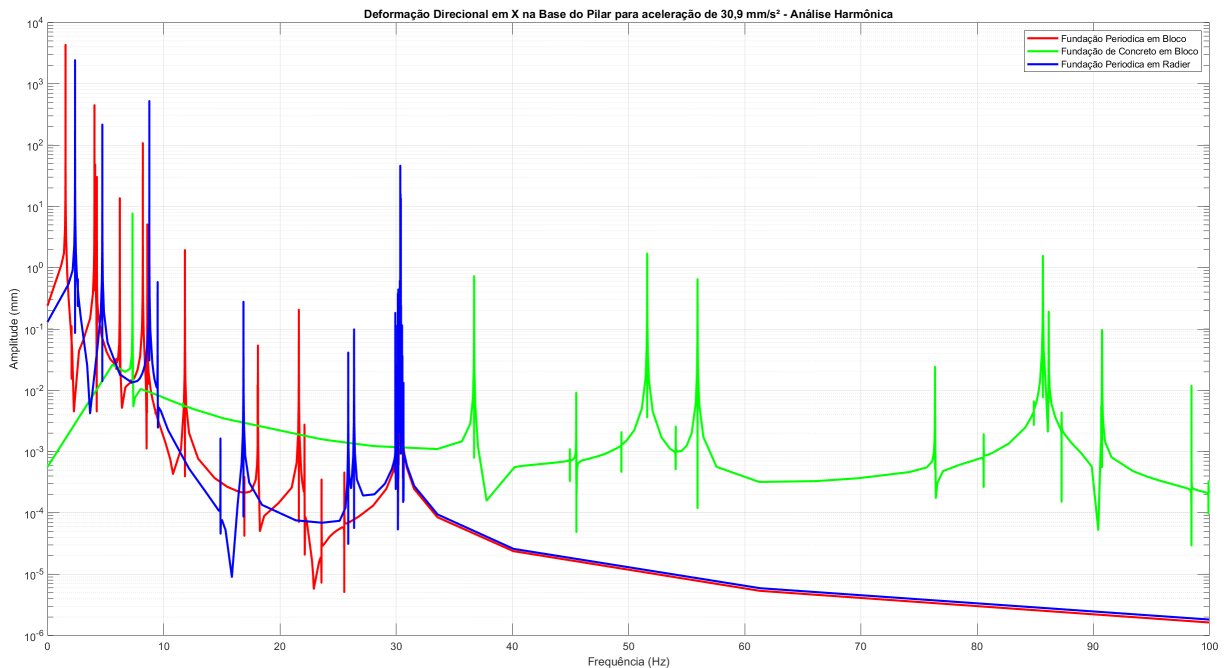
Para a análise no domínio da frequência utilizamos o software Ansys® (2023) para as simulações em FEM, com ele obtivemos a resposta dinâmica de estruturas ao induzirmos uma aceleração horizontal e vertical, nas edificações com as diferentes fundações, conforme apresentado o modelo na Figura 30. Para fins de comparação qualitativa, a análise apresenta três fundações diferentes, uma fundação periódica em bloco, uma fundação tradicional de concreto em bloco e uma fundação periódica tipo radier.

Como apresentado no capítulo anterior induzimos como carga de entrada na simulação harmônica, uma aceleração vertical e uma aceleração na base da fundação (camada de 2 cm de solo), essas acelerações possuem o mesmo valor, e foram apresentadas na Tabela 9, do Capítulo 3. Sendo assim primeiramente induzimos uma excitação de base com uma aceleração em x de $30,9\text{mm/s}^2$ mais uma aceleração no eixo y de $30,9\text{mm/s}^2$, a ideia é que essas acelerações representem a excitação que um ônibus causa a passar em uma velocidade de 50km/h , próximo a edificação com nossos modelos de fundação. Além disso foi utilizados diferentes valores de aceleração, isso porque cada tipo de veículo causa uma excitação diferente no solo, além disso, o intuito é analisar como o modelo se comporta com diferentes acelerações.

A Figura 40, apresenta os resultado em gráfico, para a resposta dinâmica na base do pilar, a resposta da estrutura no domínio da frequência apresentada como a deformação direcional no eixo x para a entrada de aceleração como excitação de base de $30,9\text{ mm/s}^2$. O gráfico de linha, apresenta o comportamento das diferentes fundações para a mesma excitação, podemos observar que a tendencia é que os picos de amplitude tendem a diminuir mais rapidamente, para fundações periódicas, e que a partir da frequência de 30 Hz não apresenta mais picos, enquanto a fundação em concreto tipo bloco, apresenta menos picos entre 1-30Hz, mas não mostra tendencia de parada para frequências maiores, tendo picos ainda nas frequências próximas a 100 Hz. Em comparação o comportamento da fundação periódica tipo bloco, com a fundação periódica tipo radier, as mesmas apresentam comportamento semelhantes, mas diferem seus picos de amplitude de 0-30hz, tendo a mesma tendencia a partir da frequência de 32 Hz.

Para deformação direcional no eixo y, na base do pilar, a fundação periódica tipo radier apresenta amplitudes maiores que a fundação periódica tipo bloco. A fundação periódica tipo bloco apresenta menos deformação tanto para frequência mais baixas, quanto para frequências

Figura 40 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, na base do Pilar para aceleração de 30,9mm/s²



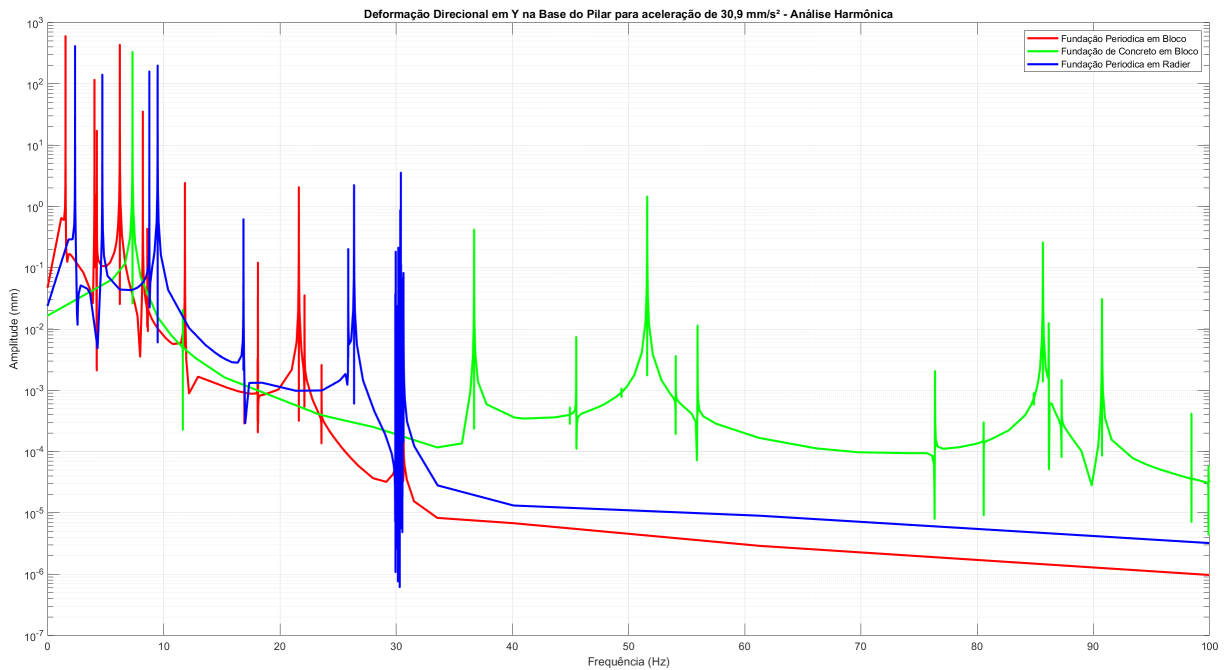
Fonte: Autoria própria (2023).

mais altas que 30Hz. Mas as duas fundações periódicas mostram comportamentos semelhantes a não apresentarem picos, para frequências maiores que 32Hz. A fundação em concreto tipo bloco apresenta menos picos em frequências menores, mas possui picos de amplitudes para frequências maiores, além de que para algumas frequências menores possui amplitudes de deformações maiores, (Figura 41). A deformação direcional em x, apresentou maiores valores de amplitude, comparado a direcional em y, para o mesmo ponto de análise, para mesma aplicação de carregamento.

Obtivemos resposta no domínio da frequência para a deformação no topo do pilar, tanto para o eixo x (Figura 42), quanto para o eixo y (Figura 43), com a mesma excitação de base, para a aceleração de 30,9mm/s². Observamos a mesma tendência do comportamento das diferentes estruturas, quando analisamos a resposta para a base e o topo do pilar. verificamos uma maior amplitude quando analisamos a deformação direcional em x, além de que as estruturas, tendem a seguir comportamento semelhante a deformação de base, pode-se notar que para a deformação direcional em x, a fundação de concreto tipo bloco, possui mais picos de aceleração em frequências maiores, que a fundação periódica bloco e radier, apresentam comportamento parecidos, mas frequências de pico diferentes, e que a fundação em bloco tende a ter amplitudes menores.

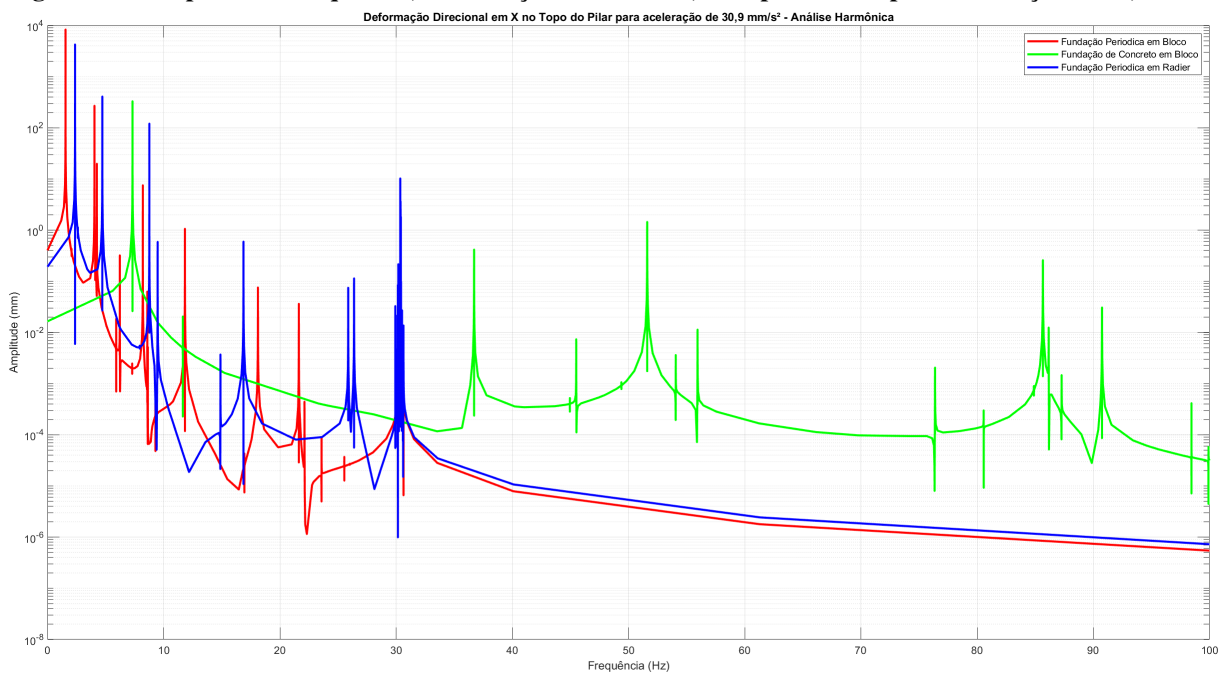
A Figura 44 ilustra os resultados em formato de gráfico para a resposta dinâmica na base do pilar. A resposta da estrutura no domínio da frequência, como deformação direcional ao

Figura 41 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, na base do Pilar para aceleração de 30,9mm/s²



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 42 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, no topo do Pilar para aceleração de 30,9mm/s²

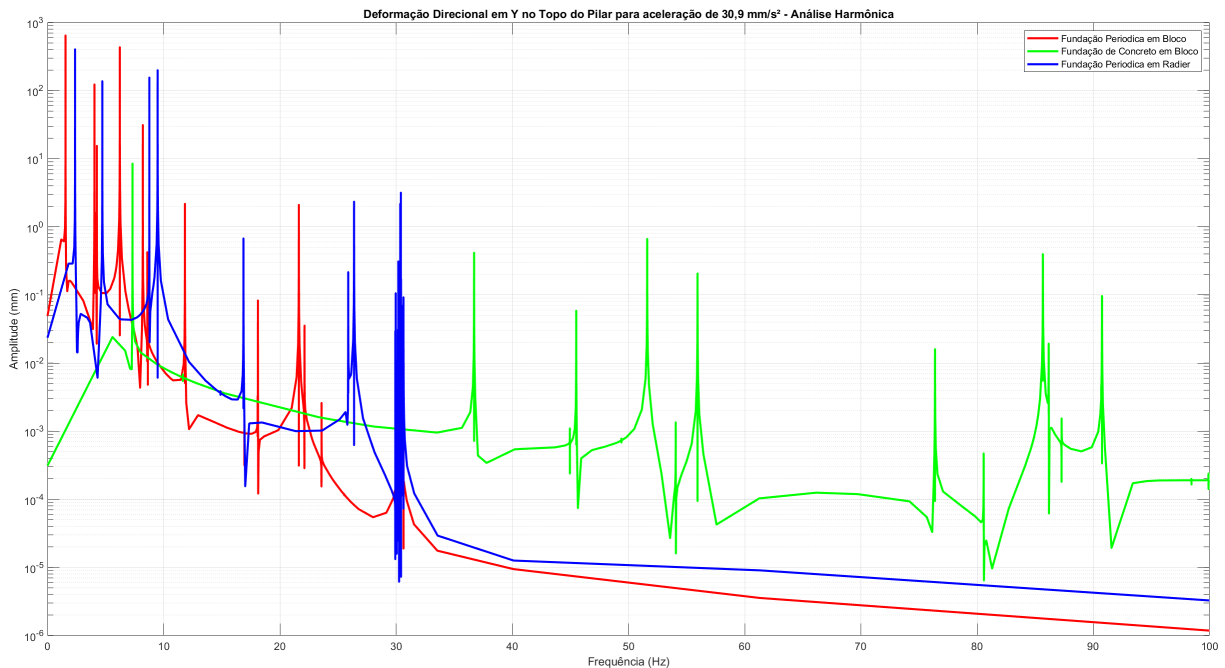


Fonte: Autoria própria (2023).

longo do eixo x, quando submetida a uma excitação de base com uma aceleração de 15,7 mm/s².

No gráfico de linha, apresenta comportamento das diferentes fundações sob a mesma excitação. Notamos é que os que o comportamento das estruturas, seguem a mesma tendencia mostrada anteriormente para aceleração de 30,9mm/s², isso porque essa analise harmônica realizada, optamos por utilizar o cluster results, que aproxima os picos de amplitude, com a

Figura 43 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, no topo do Pilar para aceleração de 30,9mm/s²



Fonte: Autoria própria (2023).

frequências naturais. Isso possibilita que seja facilitado a identificação dos picos de amplitude.

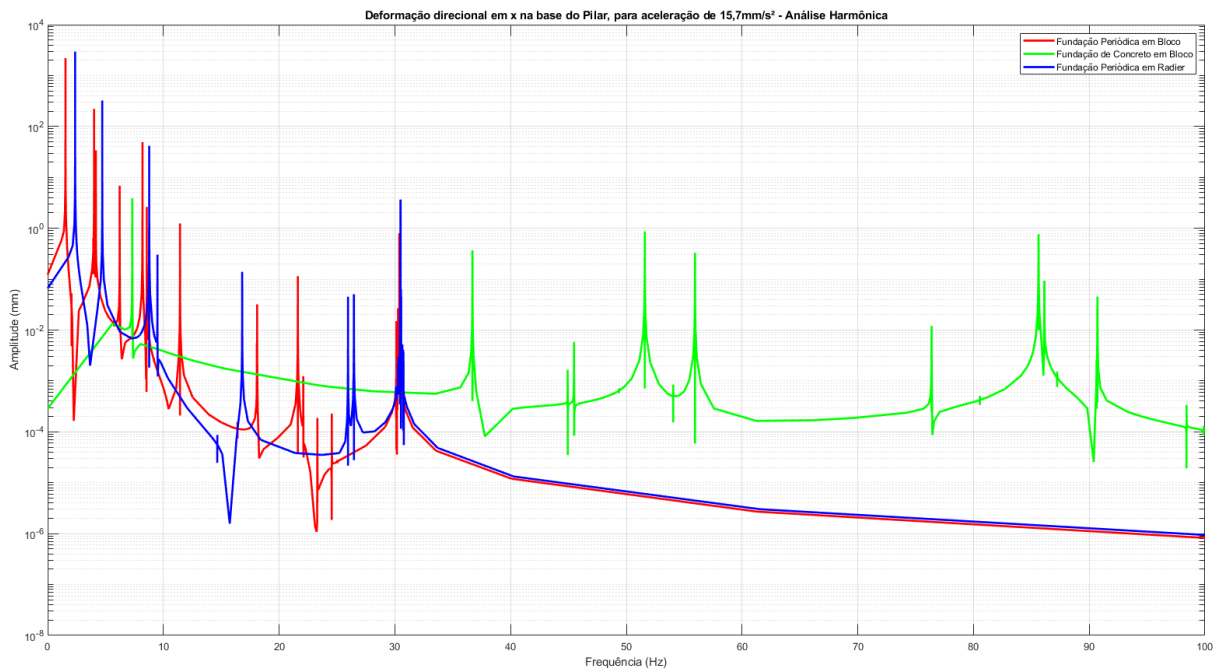
Portanto percebemos que as estruturas tendem a seguir o mesmo comportamento, mas apresentam resultados diferentes, por mais que a entrada de carregamento aplicada, seja também uma aceleração de excitação na base, vemos que o comportamento da fundação periódica tipo bloco apresentou picos com amplitudes menores que a a fundação periódica tipo radier, para deformação direcional em x.

A fundação de concreto, apresentou picos de amplitude desde frequências menores que 10Hz ate frequência maiores próximas a 100Hz. Enquanto as fundações periódicas a partir não apresentam picos de amplitudes para frequência maiores que 30 Hz.

Para a deformação direcional ao longo do eixo y (Figura 45), na base do pilar, a fundação periódica tipo radier demonstra amplitudes maiores em relação à fundação periódica tipo bloco nas frequências entre 15-30Hz. A fundação periódica tipo bloco, apresenta uma amplitude maior em 30Hz, mas depois além de não possuir mais, picos permanece com amplitude deformação menor que a estrutura com fundação periódica tipo radier. Entretanto, ambas as fundações periódicas exibem um padrão de comportamento que suprime os picos de amplitude para frequências maiores que 32 Hz.

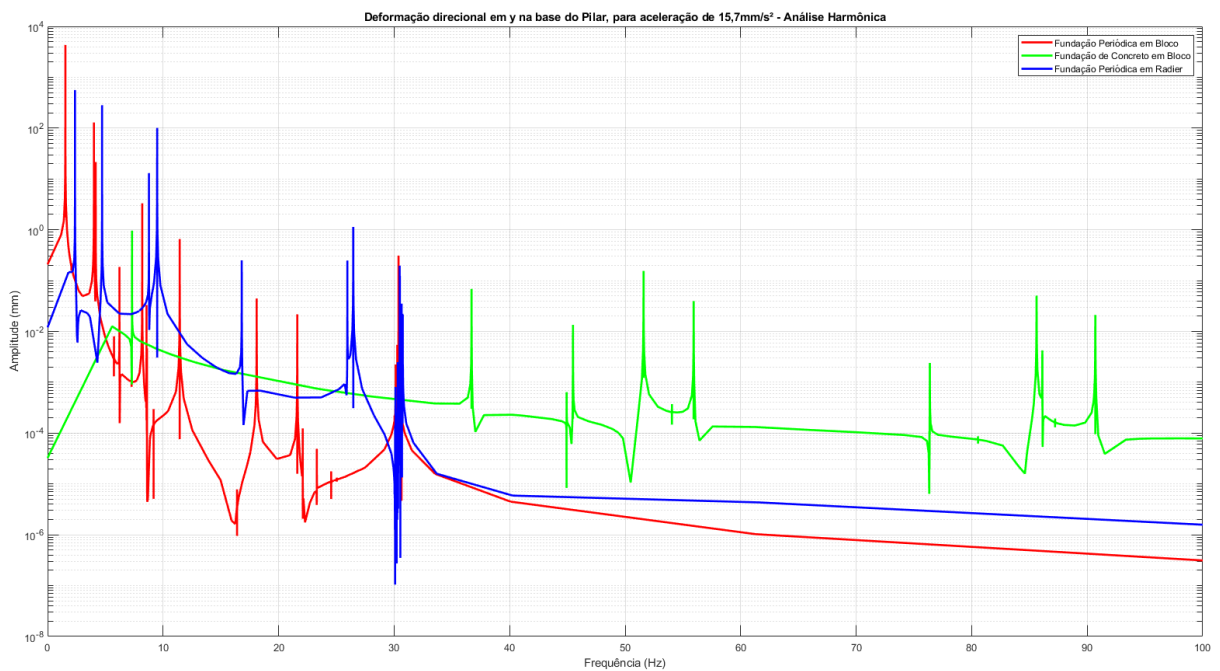
Obtivemos respostas no domínio da frequência para as deformações no topo do pilar, tanto ao longo do eixo x (Figura 46) quanto ao longo do eixo y (Figura 47), utilizando a mesma excitação de base com uma aceleração de 15,7 mm/s². Observamos uma tendência similar

Figura 44 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, na base do Pilar para aceleração de 15,7mm/s²



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 45 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, na base do Pilar para aceleração de 15,7mm/s²

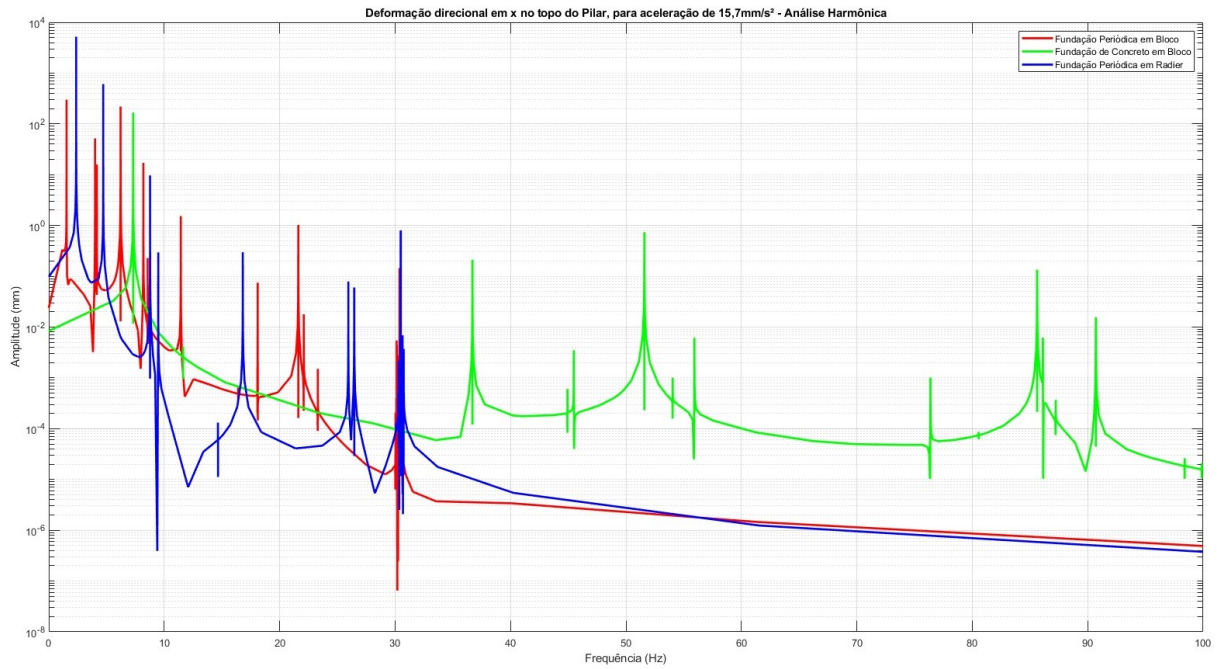


Fonte: Autoria própria (2023).

no comportamento das diversas estruturas quando as análises realizadas para a aceleração de 30,9mm/s², tanto para o eixo x, quanto para o eixo y. Porém se observarmos a amplitude da deformação das fundação periódicas, notamos que as amplitudes de deformação geradas, pela aceleração de 15,7mm/s², foram maiores para a fundação periódica tipo radier, isso acontece tanto quando olhamos para a deformação direcional em x, quanto para a deformação direcional

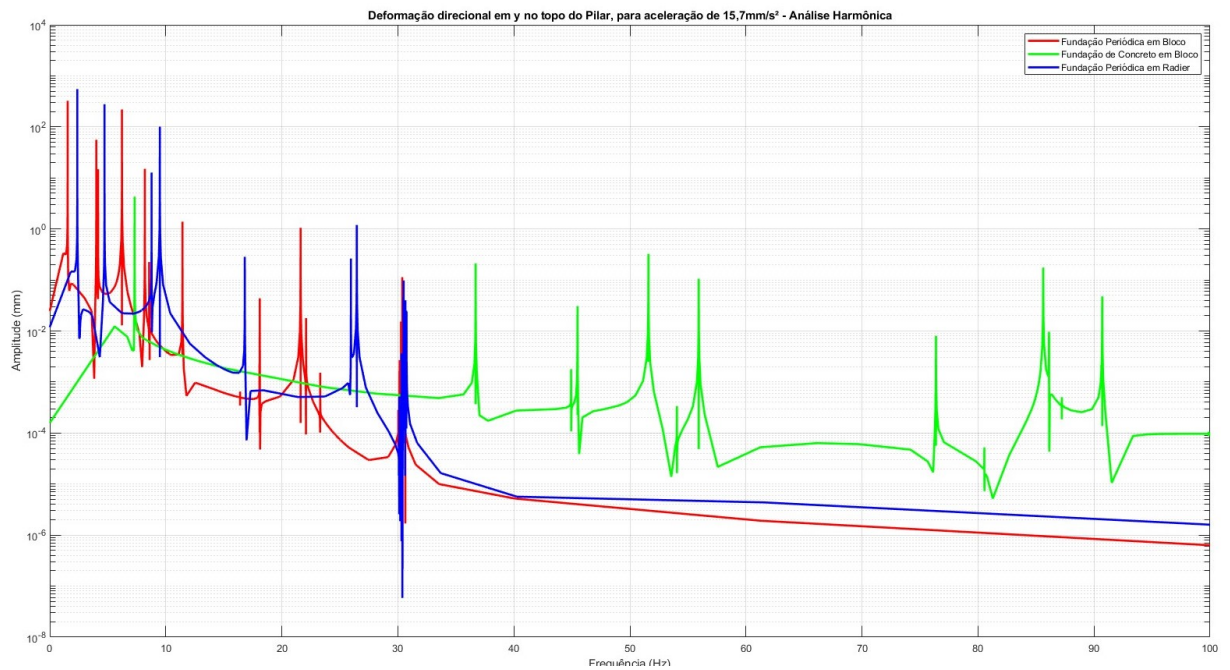
em y.

Figura 46 – Resposta da Frequência, deformação direcional x, no topo do Pilar para aceleração de $15,7\text{mm/s}^2$



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 47 – Resposta da Frequência, deformação direcional y, no topo do Pilar para aceleração de $15,7\text{mm/s}^2$



Fonte: Autoria própria (2023).

5 CONCLUSÕES

De acordo com Zhao *et al.* (2021), a combinação de diferentes camadas em uma fundação periódica é capaz de absorver e dissipar a energia transmitida pelo solo, proveniente de terremotos e outras vibrações. A utilização de polímeros em conjunto com o concreto resulta em características únicas de banda de gap, onde as ondas elásticas podem ser filtradas e impedidas de se propagarem pela estrutura quando a frequência predominante cai dentro dos gaps de banda de frequência. Xiong *et al.* (2012) ressaltam que as fundações periódicas podem consideravelmente reduzir a resposta dinâmica das estruturas superiores em movimentos verticais e longitudinais do solo.

A análise modal para as diferentes estruturas revelou informações cruciais sobre seu comportamento vibratório. Cada tipo de fundação – periódica tipo bloco, fundação em concreto tipo bloco e fundação periódica tipo radier – apresentou frequências naturais distintas nos diferentes modos de vibração, como demonstrado nas Figuras 36, 37 e 38. Destaca-se a influência do material borracha e da geometria da fundação tipo bloco. O impacto no comportamento da estrutura no quarto modo de vibração, apresentando deformação mínima na laje, para o modelo de fundação periódica tipo bloco, sugerindo os benefícios do uso desse modelo de fundação para o isolamento vibracional da estrutura.

Portanto, para uma compreensão abrangente do comportamento das estruturas analisadas, voltamos a atenção para os resultados das análises no domínio da frequência, faixa de interesse. O comportamento estrutural das diferentes fundações sob a influência de uma excitação de base com aceleração de 30,9 e 15,7 mm/s². A investigação das deformações no topo e na base do pilar ao longo dos eixos x e y revelou padrões consistentes nas características vibratórias de cada estrutura.

Ao analisar a deformação ao longo do eixo x e do eixo y, tanto para deformações no topo e na base do pilar, notamos que as fundações periódicas têm a tendência de suprimir os picos de amplitude em frequências mais elevadas, indicando uma resposta mais eficaz a essas frequências. Por outro lado, a fundação de concreto do tipo bloco apresentou menos picos na faixa de 1 a 30 Hz, mas manteve picos de amplitudes para frequências mais elevadas.

Comparando as fundações periódicas em bloco e radier, identificamos um comportamento semelhante, sugerindo uma resposta estrutural coerente entre ambas. Essa similaridade se manteve até a frequência de 30 Hz, onde ambas as fundações exibiram a supressão dos picos de

amplitude. Sendo que para acelerações menores a fundação tipo periódica tipo bloco apresentou picos de amplitudes mais baixos que a de fundação periódica tipo radier.

Ambas as fundações periódicas demonstraram uma tendência a reduzir os picos de amplitude em frequências superiores a 30 Hz, apresentando resultados benéficos para redução de vibração na faixa de frequências maiores que 30 Hz. Através de um projeto razoável, um intervalo de banda de baixa frequência e largura de banda substancial pode ser obtido regulando os parâmetros geométricos e físicos dos materiais, que podem cobrir conteúdos de frequência mais predominantes e ter uma poderosa eficácia de isolamento (ZHAO *et al.*, 2021).

Nesse contexto, é pertinente aprofundar as pesquisas e investigações relacionadas às fundações periódicas tipo bloco. Pois essas fundações, apresentam um comportamento similar ao das fundações periódicas tipo radier, e muitos pesquisadores já demonstraram os benefícios do uso desse tipo de fundação para absorção de vibrações sísmicas. Além disso, ao considerar a construção com blocos por pilares e um radier (laje tipo piso) com a mesmas células da fundação tipo bloco, fica evidente que há uma redução na quantidade de material utilizado, o que impacta positivamente nos custos de fundação.

Portanto, é importante ressaltar a relevância dos resultados dessa pesquisa para a concepção prática na construção civil. Além disso, as lacunas não preenchidas na presente pesquisa, elucidando a necessidade da continuidade nos estudos relacionados ao tema apresentado neste trabalho. Isso inclui aspectos como o dimensionamento, a execução e a viabilidade da implementação de fundações periódicas tipo bloco. Além disso, é fundamental investigar resposta ao logo do tempo, para carregamentos gerados pelo trafego. Vale a pena analisar variáveis que influenciam o sistema, distancia da via e edificação, condições do pavimento, características do fluxo de cargas nas pistas de rolagem (tipos e quantidades de veículos), as características do solo, e como essas ondas chegam até a estrutura. Análise experimental. Estudo da interação solo-estrutura também se destaca como um ponto importante. Explorar diferentes tipos de materiais compósitos para aplicações em estruturas periódicas, como concreto e isopor, concreto e fibra de cana, entre outros materiais, e outros elementos estruturais que podemos aplicar estruturas periódicas, para um melhor desempenho final da estrutura devido a esses carregamentos. Em resumo, há diversas possibilidades a serem exploradas. Dado que o sistema pode se comportar de maneira variada em resposta a diferentes fatores, investigar cada uma dessas variáveis é crucial para o avanço do conhecimento nesse campo.

Através de um projeto bem dimensionado, um intervalo de banda de baixa frequência e

largura de banda substancial pode ser obtido regulando os parâmetros geométricos e físicos dos materiais, que podem cobrir conteúdos de frequência mais predominantes e ter uma poderosa eficácia de isolamento.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, Urbano Rodriguez. **Exercícios de Fundações, 2Ed.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2010.
- Ansys®. **Software ANSYS.** Disponível <<https://www.ansys.com>>: [s.n.], 2023.
- AZEVEDO, Fernando Schiappa de; PATRÍCIO, Jorge. Vibrações ambientes. critérios de danos e de incomodidade. atualidade e perspectivas futuras. **TecniAcustia, LISBOA, Portugal, 2001.**
- BACCI, C. **Principais Normas e Recomendações Existentes Para Controle de Vibrações Provocadas Pelo Uso de Explosivos em Áreas Urbanas: parte I.** Minas Gerais: Revista Escola de Minas, 2003. 56 p.
- BAHREKAZEMI, M. **Train-Induced ground vibration and its prediction.** Estocolmo: Tese (Doutorado em Mecânica dos Solos e das Rochas) – Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Instituto Real de Tecnologia, 2004. 168 p.
- BOWLES, Joseph E. **FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN:** Fifth edition. [S.l.]: McGraw-Hill, 1996. ISBN 0-07-912247-7.
- BRITISH STANDARD. **BS 7385-2:** Evaluation and measurement for vibration in buildings. London, 1993. 16 p.
- BRITO, Luiz Antonio; SOARES Álvaro Monoel de Souza; NAZARI, Bianca. Vibração: fonte de incômodo à população e de danos às edificações no meio urbano. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 13, n. 1, p. 129–141, 2013.
- BRITO, Luiz Antonio Perrone Ferreira de; KAMIMURA, Quésia; SANTOS, Ademir Pereira dos. Influência da vibração gerada pelo tráfego ferroviário no meio urbano. **Revista Parc Fec Unicampi**, v. 5, n. 2, p. 31–39, 2014.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.
- CHAVES, G. **Contribuição à Análise de Impactos de Linhas de Transporte de Passageiros sobre Trilhos em Edificações Lindeiras.** Rio de Janeiro: Monografia CBTU, 2008. 168 p.
- CHENG, Zhibao; SHI, Zhifei. Vibration attenuation properties of periodic rubber concrete panels. **Elsevier - Construction and Building Materials**, v. 50, p. 257–265, 2013.

COSTELLA, Marcelo Fabiano; JUNGES, Franciele Cristina; PILZ, Silvio Edmundo. Avaliação do cumprimento da nr-18 em função do porte de obra residencial e proposta de lista de verificação da nr-18. **Ambiente Construído, Porto Alegre, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 14, p. 87–102, 2014.

DAS, Braja M. **Advanced Soil Mechanics**. Nova York: Taylor Francis, 2008.

DÓRIA, Luís Eduardo Santos. **Projeto de estrutura de fundação em concreto do tipo radier**. Universidade Federal de Alagoas. Centro Tecnológico. Maceió: Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas, 2007.

ELFORDA, D. P. *et al.* Matryoshka locally resonant sonic crystal. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 130, n. 5, 2011.

FALCONI, Frederico; CORRÊA, Celso N.; ORLANDO, Celso; SCHIMDT, Cristina; ANTUNES, William R.; ALGUQUERQUE, Paulo J.; HACHICH, Waldemar; NIYAMA, Sussumu. **FUNDAÇÕES teoria e prática, 3Ed.** São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

FILHO, Celso G. B.; ARAÚJO, Tereza D. P. Estudo anaítico sobre velocidade de vibração de solos próximos a linhas ferroviárias. *In*: ABMEC (Ed.). **Proceedings of the XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. Foz do Iguaçu/PR, Brazil: [s.n.], 2020.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. A first course in finite elements. *In*: SONS, Ltd John Wiley (Ed.). **A First Course in Finite Elements**. West Sussex PO19 8SQ, England: [s.n.], 2007.

FRANÇOIS, S. *et al.* The influence of dynamic soil–structure interaction on traffic induced vibrations in buildings. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 27, p. 655–674, 2007.

HARTUNG, H. *et al.* Ultra thin high index contrast photonic crystal slabs in lithium niobate. **Optical Materials**, v. 3, n. 2, p. 19–21, 2010.

HE, Jimin; FU, Zhi-Fang. Modal analysis. *In*: BUTTERWORTH-HEINEMANN (Ed.). **Modal analysis**. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: [s.n.], 2001.

HU, L. *et al.* A hollow-core photonic band-gap fiber based methane sensor system capable of reduced mode interference noise. **Infrared Physics Technology**, v. 97, p. 105–107, 2019.

HUANG, Ting Ting; REN, Xin; ZENG, Yi; ZHANG, Yi; LUO, Chen; ZHANG, Xiang Yu; XIE, Yi Min. Based on auxetic foam: A novel type of seismic metamaterial for lamb waves. **Engineering Structures - Elsevier**, v. 246, n. 112976, 2021.

HUNAIDI, Osama. Traffic vibrations in buildings. **National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction**, v. 239, 2000.

(IBRACON), INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Prática recomendada IBRACON para estruturas de edifícios de nível 1: estruturas de pequeno porte: comitê técnico CT-301: concreto estrutural**. São Paulo: IBRACON: IBRACON, 2001.

INMAN, Daniel J. **Engineering Vibration**: 3rd edition. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 0-13228173-2.

ISO-4866. **Mechanical Vibration and shock - Vibration of buildings Guideiines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings**. Certificação Digital N° 0521524/CA, 1990.

JOANNOPOULOS, John D.; JOHNSON, Steven G.; WINN, Joshua N.; MEADE, Robert D. **Photonic crystals: molding the flow of light**: Quarta edição. [S.l.]: Princeton University Press, 2007. ISBN 978-0-691-12456-8.

KIM, Dog soo; LEE, Jin-Sun. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 19, p. 115–126, 2000.

LAMBE, Thomas William; WHITMAN, Robert V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1969.

LIU, Xinnan; REN, Yiqiang; SONG, Xiaoruan. Combined attenuation zones of combined layered periodic foundations. **Appl. Sci.**, v. 11, n. 7114, 2021.

MEAD, D. M. Wave propagation in continuous periodic structures: Research contributions from southampton, 1964–1995. **Journal of Sound and Vibration**, v. 190, n. 3, p. 495–524, 1996.

PAZ, Mario; LEIGH, William. **Dynamics Structural**: Fifth edition. [S.l.]: kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 1-4020-7557-3.

PUC-RIO. **Análise harmônica**. Certificação Digital N° 0821357/CA, 2023.

PUC-RIO. **Critérios de Conforto Humano**. Certificação Digital N° 0521524/CA, 2023.

PUC-RIO. **Método dos Elementos Finitos**. Certificação Digital N° 0410284/CA, 2023.

RAO, Singiresu S. **Vibração Mecânica**: Quarta edição. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN 9788576052005.

SANTOS, RODRIGO BORGES. **AN ALTERNATIVE APPROACH TO DESIGN PERIODIC RODS**. Ilha Solteira - SP, 2018.

SCHELEDER, Jessica; LIMA, Marcelo Ricardo de. **EXPERIMENTOTECA DE SOLOS DENSIDADE DO SOLO**. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. Rua dos Funcionários, 1540 - 80035-050 - Curitiba - PR, 2009.

SHIGLEY, J. E. **Dinâmica das máquinas**. São Paulo: Edgard Blücher: trad. Mauro Ormeu C. Amorelli, 1969.

SIGALAS, M. *et al.* Classical vibrational modes in phononic lattices: theory and experiment. **Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München**, v. 220, p. 765–809, 2005.

SILVA, Samuel. **Vibrações Mecânicas**. Notas de Aulas - 2.o Versão. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE. Foz do Iguaçu - PR, Brasil, 2009.

TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, M. Cristina Motta De; FAIRCHILD, Thomas Rich; FABIO, Taioli. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos : USP, 2000., 2003. 558 p.

TERZAGHI, KARL. **THEORETICAL SOIL MECHANICS**. PRINTED IN THE UNITED STATES OF AMERICA: John Wiley and Sons, 1943.

TRICHÊS, Glicério. Determinação do coeficiente de poisson de solos, a compactados, no ensaio triaxial dinâmico e o cálculo de deflexão de pavimentos. *In: COPPE/UFRJ (Ed.). Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia*. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 1985.

VERRUIJT, Arnold. **SOIL MECHANICS**. Delft: Delft University of Technology, 2006.

XIONG, Chen; SHI, Zhifei; XIANG, Hongjun. Attenuation of building vibration using periodic foundations. **Advances in Structural Engineering**, v. 15, n. 8, p. 1375–1388, 2012.

YANG, L. *et al.* Significant reduction of graphene thermal conductivity by phononic crystal structure. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 91, p. 428–432, 1996.

ZHAO, Chunfeng; ZENG, Chao; WITARTO, Witarto; HUANG, Hsuan wen; DAI, Junwu; MO, Y.L. Isolation performance of a small modular reactor using 1d periodic foundation. **Engineering Structures**, v. 244, 2021.

ZIENKIEWICZ, O. C. *et al.* The finite element method: Its basis and fundamentals. *In: BUTTERWORTH-HEINEMANN (Ed.). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals 7ed.* Oxford: [s.n.], 2013.

ZOLINA, Tatiana; KUPCHIKOVA, Natalya. Influence of vibration impacts from vehicles on the state of the foundation structure of a residential building. **E3S Web of Conferences - Innovative Technologies in Environmental Science and Education - ITESE**, v. 135, n. 03053, 2019.