

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

STÉFANE CHRISTINE FREITAS OLIVEIRA CRUZ

ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS MODELADAS COMO SHEAR BUILDING

Jataí
2022

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC – Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Stéfane Christine Freitas Oliveira Cruz

Matrícula: 20161020260293

Título do Trabalho: Análise Dinâmica De Estruturas Modeladas Como Shear Building

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

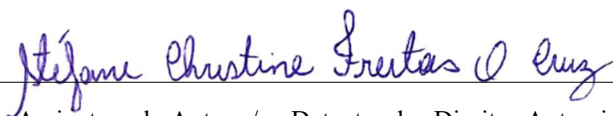
- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
- ☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
- ☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 18/08/2022



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

STÉFANE CHRISTINE FREITAS OLIVEIRA CRUZ

ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS MODELADAS COMO SHEAR BUILDING

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Eulher Chaves Carvalho

Jataí
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Cruz, Stéfane Christine Freitas Oliveira.

Análise dinâmica de estruturas modeladas com Shear Building
[manuscrito] / Stéfane Christine Freitas Oliveira Cruz. -- Jataí: IFG,
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.
43 f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Eulher Chaves Carvalho.
Bibliografias.

1. Cálculo estrutural. 2. Simplificação de cálculo. 3. Python. I. Carvalho,
Eulher Chaves. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária – Rosy Cristina O. Barbosa – CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F048/2022-1.

FOLHA DE APROVAÇÃO

STÉFANE CHRISTINE FREITAS OLIVEIRA CRUZ

ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS MODELADAS COM SHEAR BUILDING

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 15 de julho de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eulher Chaves Carvalho
Presidente da banca / Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof^ª. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Enga. Civil Ma. Márcia Franco de Assis
Membro Externo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiano

Documento assinado eletronicamente por:

- **Stéfane Christine Freitas Oliveira Cruz, 20161020260293 - Discente**, em 16/08/2022 23:00:13.
- **Monica Maria Emerenciano Bueno, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/07/2022 20:05:06.
- **Márcia Franco de Assis , Márcia Franco de Assis - 214205 - Engenheiro civil - Prefeitura Municipal de Jataí (1)**, em 18/07/2022 15:29:40.
- **Eulher Chaves Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/07/2022 15:12:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/07/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 303535

Código de Autenticação: a531d180a5



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant,
JATAÍ / GO, CEP 75804-714(64) 3605-0837 (ramal: 837)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho principalmente aos meus pais, que sempre me apoiaram como puderam, mesmo antes da faculdade, sempre me incentivando a focar nos estudos e dando toda a condição para que meu único foco fossem os livros.

Dedico também a todos os professores e colegas, pois é graças a cada um de vocês, cada conselho, puxão de orelha, empurrão, que este presente momento se realiza. Todos são muito importantes para mim e vou sempre levar cada um de vocês com todo carinho por onde eu for.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois é graças a Ele que conquistei tudo o que tenho hoje. Ele me deu as condições necessárias, a paciência, inteligência, saúde e sabedoria que eu precisei até aqui.

Direciono meus agradecimentos ao meu professor orientador Eulher Chaves Carvalho, que dispôs de muita paciência com minha pessoa durante todo o desenvolvimento do trabalho e foi super atencioso com minha lentidão em desenvolvimento e entendimento do proposto, participando das reuniões sempre com um sorriso que faz meu dia.

Também dedico meus agradecimentos à professora Francielle Coelho dos Santos, que me deu todo apoio quando precisei, não só no Trabalho de Conclusão de Curso, mas como professora e pessoa, durante o curso.

Agradeço também aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram durante todo o curso, desde dar o ombro para choros com reprovações, a buscar material esquecido em casa em dia de apresentação de trabalhos, sempre me ajudando da forma que puderam. Aos meus colegas de classe que me acolheram em uma turma nova e sempre me ajudaram com o que precisasse.

Também merece seu destaque aqui meus amigos, que me ampararam e ajudaram durante os últimos anos, com destaque especial aos meus amigos Rubens Quirino de Moraes Filho e Wederson Cabral Domingues, pelo apoio de sempre e pela sua grande ajuda com esta monografia, com a escolha da linguagem de programação e no aprendizado da linguagem.

Aos professores de todo o decorrer do curso, também agradeço, pois sei como é difícil tentar preparar conteúdos interessantes e é graças a cada pedacinho de conhecimento, toda puxada de orelha, todo conselho que cada um me passou neste caminhar que estou aqui hoje.

“Vá o mais longe que puder, mas nunca esqueça de onde você veio”

Autor desconhecido

RESUMO

A Engenharia Civil é uma indústria, diferenciando-se de outros ramos industriais por sua itinerância. Nos dias atuais, há a necessidade de que os processos industriais sejam, ao máximo, automatizados, desde os processos iniciais aos processos de revisão e aplicação de garantias. Entre estes, o processo de análise de estruturas dinâmicas é crucial para evitar que a estrutura alcance seu Estado Limite de Serviço (E.L.S), ou mesmo o Estado Limite Último (E.L.U), devido às cargas dinâmicas que estão sempre, em maior ou menor grau, presentes nas edificações. Como dito, este processo necessita de automatização, o que é proposto no presente trabalho, onde estuda-se o processo de análise de edifícios pelo modelo Shear Building, que foi implementado a partir da linguagem de programação Python, sendo capaz de retornar ao usuário a matriz de rigidez e a matriz de massa da estrutura. O software foi desenvolvido para ser executado nos sistemas operacionais Linux e Microsoft Windows.

Palavras-chave: Cálculo Estrutural, Simplificação de Cálculo, Python.

ABSTRACT

Civil Engineering is an industry, differing from other industrial branches by its roaming. Nowadays, there is a need for industrial processes to be, as much as possible, automated, from the initial processes to the review processes and application of guarantees. Among these, the process of analyzing dynamic structures is crucial to prevent the structure from reaching its Serviceability Limit State (E.L.S), or even the Ultimate Limit State (U.L.S), due to the dynamic loads that are always, to a greater or lesser degree, present in buildings. As said, this process needs automation, which is proposed in the present work, where the process of building analysis is studied by the Shear Building model, which was implemented from the Python programming language, being able to return to the user the stiffness matrix and the structure's mass matrix. The software is designed to run on Linux and Microsoft Windows operating systems.

Keywords: Shear Building. Dynamic Structures. Python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de Shear Building.....	20
Figura 2.2 – Representação de Shear Building em uma coluna.....	20
Figura 2.3 – Modelo de massas concentradas em sistema massa-mola para representar um Shear Building.....	21
Figura 4.1– Edificação com um grau de liberdade.....	27
Figura 4.2 – Deslocamentos das vigas do exemplo 1.....	81
Figura 4.3 – Edifício com dois graus de liberdade.....	31
Figura 4.4– Deformações do exercício 2.....	31
Figura 5.1 - Visualização do usuário durante a execução do software.....	35
Figura 5.2 - Fluxograma com lógica utilizada no software (Parte 1)	36
Figura 5.3 - Fluxograma com lógica utilizada no software (Parte 2)	37
Figura 5.4– Resolução do problema hipotético 1 (Parte 1)	38
Figura 5.5– Resolução do problema hipotético 1 (Parte 2)	38
Figura 5.6– Resolução do problema hipotético 1 (Parte 3)	39
Figura 5.7 – Resolução do problema hipotético 2 (Parte 1)	40
Figura 5.8 – Resolução do problema hipotético 2 (Parte 2)	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC – Trabalho de conclusão de curso

TIC - Tecnologia da Informação e Comunicação

Hz – Hertz.

Cps – Ciclos por segundo.

Kips – Quilo libras.

S – Segundos.

cm – Centímetros.

Kip/cm – Quilo libras por centímetro.

Kip/cm² – Quilo libras por centímetro quadrado.

NDE - Núcleo Docente Estruturante.

IDE - Integrated Development Environment

LISTA DE SÍMBOLOS

n – Variável que representa qualquer número natural

K_i – Constante da mola i , com i sendo o número que representa qualquer mola do caso estudado

k – Constante da mola de uma coluna uniforme

E - Módulo da elasticidade do material

I - Momento de inércia da área da seção

L - Distância entre os pisos

m_1, m_2 e m_3 – Massas concentradas dos pisos 1, 2 e 3, respectivamente

$[M]$ – Matriz de massa

$[K]$ – Matriz de rigidez

$\{y\}$ – Vetor de deslocamento

$\{\ddot{y}\}$ – Vetor de aceleração

$\{F\}$ - Vetor de força

F_{ij} – Coeficiente de flexibilidade nas coordenadas i e j

$[f]$ - Matriz de flexibilidade

W – Massa concentrada do pavimento

w – Frequência natural da estrutura

a – Amplitude do movimento

a_i – Amplitude do movimento na i -ésima coordenada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 Introdução	17
1.1 Aspectos Gerais.....	17
1.2 Justificativa	18
1.3 Objetivo.....	19
1.4 Metodologia	19
1.5 Escopo	19
CAPÍTULO 2 O modelo <i>shear building</i>	20
CAPÍTULO 3 o <i>software</i>	25
3.1 O Que é o Python	25
3.2 Porque o Python?	26
3.3 Biblioteca Sympy	26
3.4 <i>Integrated Development Environment</i>	26
CAPÍTULO 4 ENSAIOS NUMÉRICOS	27
4.1 Sisema hipotético com 1 grau de liberdade.....	27
4.2. sistema hipotético com 2 graus de liberdade.....	29
CAPÍTULO 5 RESULTADOS OBTIDOS	32
5.1. Funcionamento Do Software Desenvolvido Para Edifícios De 1 Andar	37
5.2. Funcionamento Do Software Desenvolvido Para Edifícios De Vários Andares.....	39
CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A cada dia que passa, novas tecnologias são lançadas no mercado, com o objetivo de facilitar o dia a dia de seus usuários. Na engenharia isso não é diferente, atualmente, possuímos vários softwares nesta área que facilitam o trabalho do engenheiro e economizam horas de trabalho, que podem ser melhor aproveitadas de outra forma.

Neste capítulo, há uma contextualização dos parâmetros atuais do acesso dos brasileiros à internet, além de detalhes importantes deste trabalho, como a justificativa para o tempo dedicado ao tema escolhido, os objetivos da realização dessa pesquisa e a metodologia utilizada para a realização do trabalho.

1.1 ASPECTOS GERAIS

O cálculo estrutural é parte crucial de um projeto seguro e funcional. Ele exige do engenheiro conhecimentos de diversas áreas, tais como, física mecânica, ciência dos materiais e mecânica dos sólidos. Assim, pode-se afirmar que é, a partir do cálculo estrutural, que se elabora um projeto estrutural, podendo-o ser dividido em quatro etapas: concepção estrutural, análise estrutural, dimensionamento e emissão de pranchas (LOBÃO, 2020).

O projeto estrutural é, portanto, de suma importância, pois as estruturas são destinadas ao uso humano, logo, uma eventual ausência de segurança para os usuários poderá causar perdas monetárias e de vidas. Diante disso, é extremamente necessário conhecer ou prever o comportamento estrutural das edificações de forma detalhada, incluído, frente a presença de cargas dinâmicas, que embora não pareçam corriqueiras, estão presentes no cotidiano, a saber: ventos, sismos, tráfego de automóveis, tráfego de pessoas, movimento de máquinas, entre outras.

O estudante de engenharia civil, ao se deparar com conteúdos relacionados com o projeto estrutural, tem seus estudos primeiramente direcionados ao comportamento estático, isto é, sem deslocamentos. No decorrer do curso são introduzidos novos conceitos, sejam de deslocamentos ou mesmo de dinâmica das estruturas, os quais permitem a realização de cálculos mais precisos e próximos da realidade do objeto de cálculo. Todavia, um aprofundamento acerca da dinâmica estrutural, para além das verificações normativas, são contemplados, regra geral, em cursos de aperfeiçoamento.

A análise dinâmica de estruturas se diferencia da análise de estruturas estáticas por ser um cálculo feito em relação ao tempo e serem adicionados ao cálculo forças inerciais, que

respondem naturalmente ao movimento da estrutura estudada. A escolha do método mais adequado para um caso específico, depende das propriedades físicas do sistema e da excitação a que ele esteja submetido (RIBEIRO, 1998). Por exemplo, o modelo de cálculo de cargas dinâmicas proposto por PAZ (1991), nomeado como *Shear Building*, ou Edifícios Simples, considera que os edifícios produzem rotações nos membros horizontais na altura dos pisos, sendo um método apropriado para estruturas que trabalharão, predominantemente, nesta situação.

No sistema *Shear Building* os pisos são totalmente rígidos e incompressíveis, então o deslocamento do piso é distribuído para todas as colunas igualmente, sendo que as vigas dos pavimentos são consideradas infinitamente rígidas em relação às colunas em que se apoiam, esta simplificação faz com que o número de graus de liberdade da estrutura seja correspondente ao número de pavimentos do modelo em estudo (FIGUEIREDO, 2018). Portanto, para fins de cálculo, transfere-se todas as informações deste piso para o seu centro de massa, que seria o centro da área da laje em planta baixa. (WINKEL, 2017).

1.2 JUSTIFICATIVA

O modelo *Shear Building* para análise dinâmica de estruturas, pelas características explicitadas no tópico anterior, resulta convidativo ao processo de automação. Cabe destacar, portanto, que atualmente o acesso a computadores e à internet é facilitado. Em pesquisa feita no ano de 2020 (ROSA, 2021), concluiu-se que os computadores estão presentes em 100% dos domicílios de cidadãos na classe social A, em 85% dos domicílios de famílias classe B e em 50% dos lares de brasileiros classe C e essa porcentagem passa a ser de 13%, quando se tratando de famílias de classe D e E. Número que estava caindo, uma vez que em 2016 eram 50% dos lares brasileiros que possuíam computadores, porém, a aquisição de computadores em decorrência do ensino e trabalho remoto, fez com que este índice aumentasse 39%, em 2019, para os atuais 45%. Tal pesquisa mostra a favorabilidade de plataformas criadas exclusivamente para computadores, uma vez que o acesso a estes ainda apresenta índices favoráveis quanto à disponibilidade para os demais cidadãos brasileiros, principalmente estudantes de engenharia e engenheiros formados, à computadores.

A partir das afirmações anteriores, vê-se a necessidade de criar um cálculo automatizado de esforços gerados por cargas dinâmicas, unindo acessibilidade, precisão e rapidez na análise de estruturas dinâmicas, justificando assim a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

1.3 OBJETIVO

Para sanar a demanda de *softwares* acadêmicos e gratuitos para a análise estrutural, este trabalho visa, como objetivo geral, o estudo da formulação proposta pelo engenheiro Mario Paz para a análise de sistemas estruturais submetidos a cargas dinâmicas, para então, de forma específica, desenvolver um algoritmo para subsidiar a análise dinâmica de estruturas por meio do modelo *Shear Building*, fornecendo as matrizes de rigidez e de massa das estruturas em estudo. Tal *software* deverá ser aplicado em computadores com sistema operacional Linux e Microsoft Windows, utilizando-se da linguagem de programação Python.

1.4 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo deste trabalho, primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica de conteúdos referentes à análise dinâmica de estruturas, tendo como estudo base o modelo *Shear Building* (PAZ, 1991).

Em seguida, foi feita uma análise do conteúdo produzido para identificação dos cálculos necessários ao *software* desenvolvido. Finalizado o estudo da linguagem de programação, para continuidade, seguiu-se com o desenvolvimento do *software*, encaminhando-o no sentido da determinação das frequências naturais de vibração da estrutura.

Com o *software* em pleno funcionamento, deu-se início à fase beta do desenvolvimento, onde o *software* foi testado e avaliado a partir de ensaios numéricos de validação.

1.5 ESCOPO

No presente capítulo foi mostrada a importância da análise dinâmica de estruturas para evitar o colapso estrutural, entendendo que os prejuízos causados por uma estrutura colapsada não estão restritos às perdas materiais. Também foi visto a necessidade da automatização de processos na indústria da construção civil e que o processo de análise de estruturas também deve fazer parte de tal automatização, afastando a preocupação de que os profissionais deste setor produtivo sejam lesados por falta de acesso a ferramentas computacionais de apoio ao dimensionamento estrutural.

No Capítulo 2 apresenta-se o modelo utilizado para a análise dinâmica, onde será sintetizado o modelo proposto pelo engenheiro Mário Paz no livro *Dinámica Estructural: Teoría y Cálculo* (PAZ, 1991), expondo e explicando toda formulação indicada pelo engenheiro.

O Capítulo 3 traz a definição do que é o Python, onde é discutido brevemente a sua origem, os primeiros utilizadores da linguagem, o motivo de sua disseminação, a justificativa pela escolha desta linguagem e a biblioteca mais utilizada para a realização desta monografia.

No Capítulo 4 vê-se, em detalhe, o método aplicado em dois ensaios numéricos de validação, onde será calculada a frequência natural das estruturas propostas, estruturas estas com um e dois graus de liberdade.

O Capítulo 5, por sua vez, apresenta os resultados obtidos a partir da pesquisa realizada, isto é, o produto técnico desenvolvido, validando a sua utilização com os ensaios numéricos explicitados no capítulo anterior.

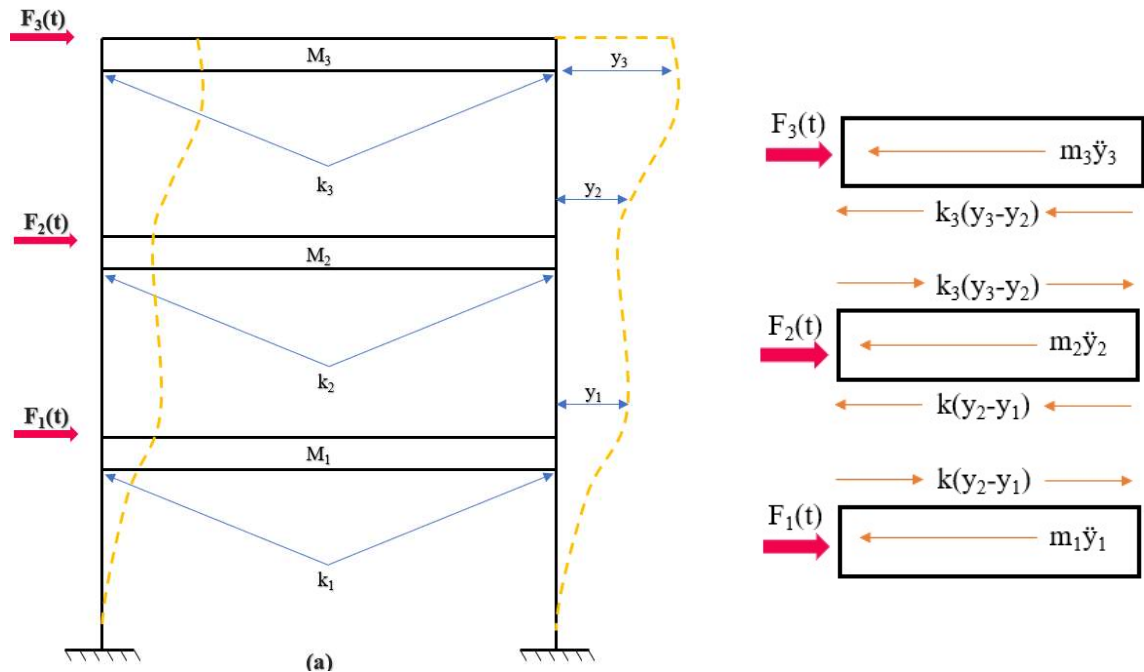
As conclusões obtidas a partir desse TCC são discutidas no tópico “Conclusões”. Este volume encerra-se nas referências.

CAPÍTULO 2 O MODELO *SHEAR BUILDING*

Shear Building, do inglês, Edifício de Cisalhamento, ou Edifício Simples, é definido como uma estrutura calculada para resistir somente a forças de cisalhamento, assim como o próprio nome indica, sem considerar a flexão em uma seção horizontal no nível dos pavimentos. Pode-se dizer que o modelo de edifício *Shear Building* tem as características de uma viga em balanço deformada somente pelo esforço cortante (PAZ, 1991).

Este modelo é uma forma simplificada de analisar um edifício de “n” pavimentos. Durante esta análise, assume-se que toda massa do edifício é distribuída nos níveis dos pisos (tais quais são totalmente rígidos e incompressíveis) e que a viga dos pavimentos seja infinitamente rígida em relação às colunas. Nesta forma de análise, o número de graus de liberdade do edifício corresponde ao número de pavimentos da construção estudada (FIGUEREDO, 2018).

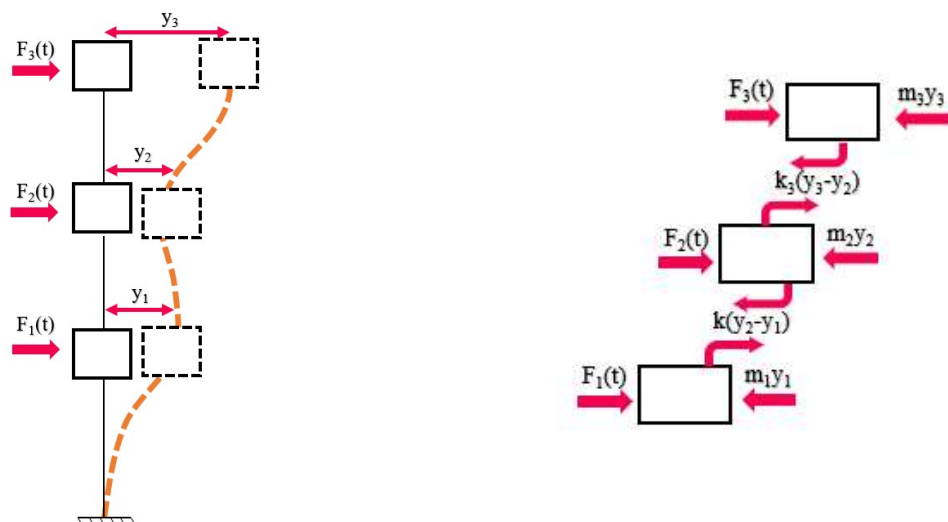
Deve-se notar que o edifício pode ter qualquer número de vãos horizontais, mas apenas por conveniência, representa-se aqui o edifício simples com somente um vão horizontal, como pode-se ver na Figura 2.1(a). Para simplificar ainda mais a forma de representação, pode-se idealizar o edifício simples como uma só coluna, Figura 2.2(a), com massas concentradas à altura dos pisos, no entendimento de que somente são possíveis deslocamentos horizontais destas massas.

Figura 2.1 – Modelo de *Shear Building*.

(a) Modelo mecânico do edifício com múltiplos pavimentos.

(b) Forças atuantes nos andares, onde K representa a rigidez, F é igual à força aplicada e m é a massa aplicada ao pavimento.

Fonte: Adaptado de PAZ (1991)

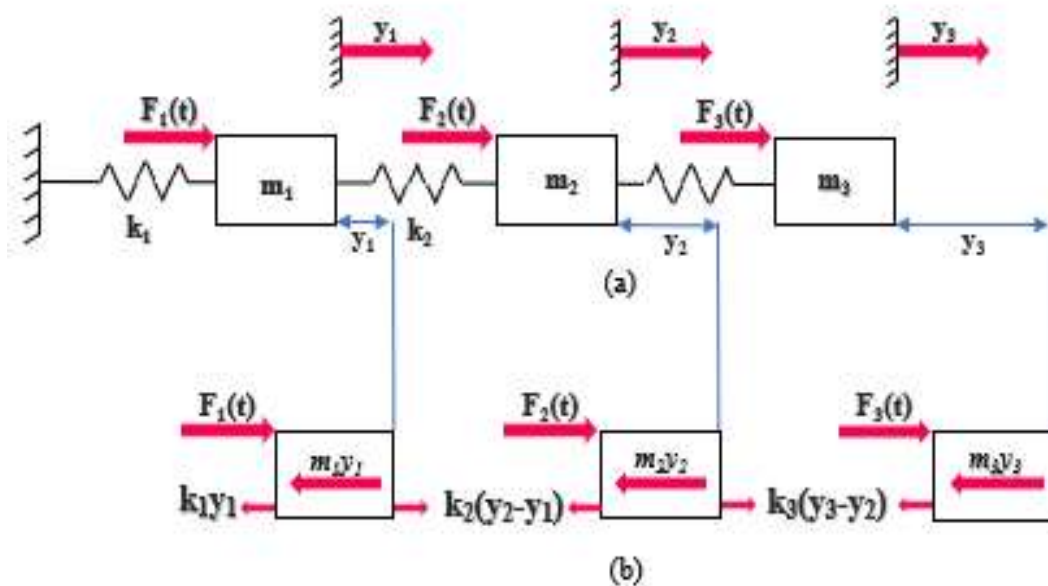
Figura 2.2 – Representação do *Shear Building* por meio de uma única coluna.

- a) Modelo de uma coluna para representar um *Shear Building* de três pavimentos
- b) Representação dos deslocamentos de um *Shear building* de três pavimentos

Fonte: Adaptado de PAZ (1991).

Outra alternativa para representação de um Edifício Simples é adotar um modelo massa-mola, como o que se mostra na Figura 2.3. Em qualquer das três representações mostradas, o coeficiente de rigidez ou constante da mola k_i entre duas massas consecutivas, é a força requerida para produzir um deslocamento relativo de magnitude unitária entre os dois pisos adjacentes.

Figura 2.3 – Modelo massa-mola.



1. Modelo massa-mola de um *Shear Building* de três pavimentos.
2. Deslocamentos do modelo massa-mola representado em a).

Fonte: Adaptado de PAZ (1991).

Levando em conta as simplificações propostas para o modelo *Shear Building*, algumas fórmulas foram estabelecidas para a análise dinâmica de tais edifícios, como o citado no livro *Dinâmica Estrutural: Teoría y Cálculo* (PAZ, 1991).

Para uma coluna uniforme, com suas duas extremidades fixas e sem a possibilidade de rotação, a constante da mola é dada pela Equação 2.1:

$$k = \frac{12 EI}{L^3} \quad 2.1$$

Onde, E representa o módulo da elasticidade do material, I é o momento de inércia da área da

seção e L é a distância entre os pisos.

Quando se trata de uma coluna com um extremo fixo e o outro articulado, a constante da mola é dada pela Equação 2.2:

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad 2.2$$

Deve-se entender que as três representações que foram ilustradas nas Figuras 2.1 a 2.3 são equivalentes. Por consequência, as equações de movimento de um edifício simples de três andares podem ser obtidas a partir de qualquer um dos três diagramas de corpo livre de tais imagens, isto é, igualando a zero a soma das forças que atuam em cada uma das massas. Assim, obtêm-se, o seguinte sistema:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) - F_1(t) &= 0, \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) - k_3 (y_3 - y_2) - F_2(t) &= 0, \\ m_3 \ddot{y}_3 + k_3 (y_3 - y_2) - F_3(t) &= 0. \end{aligned}$$

O sistema de Equações 2.3 é constituído pela formulação de rigidez das equações de movimento que, para este modelo, possui três pisos. Este sistema também pode ser escrito, convenientemente, usando matrizes, assim como:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [K]\{y\} = \{F\} \quad 2.3$$

onde, $\{y\}$, $\{\ddot{y}\}$, $\{F\}$, são, respectivamente, os vetores de deslocamento, de aceleração e de força, $[M]$ representa a matriz de massa e $[K]$, a matriz de rigidez, que podem ser escritas como as matrizes a seguir, respectivamente:

$$\begin{aligned} [M] &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \\ [K] &= \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad 2.6$$

$$\{y\} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad 2.4$$

$$\{\ddot{y}\} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix} \quad 2.5$$

$$\{F\} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{bmatrix} \quad 2.6$$

Deve-se notar que a matriz de massa é uma matriz diagonal, pois os elementos diferentes de zero estão apenas na diagonal principal. Os elementos pertencentes à matriz de rigidez, são chamados de coeficientes de rigidez. Em geral, o coeficiente de rigidez k_{ij} é a força elástica da

mola na coordenada i quando a coordenada j se desloca uma unidade, enquanto que todas as outras coordenadas permanecem imóveis.

O cálculo da frequência natural de um edifício se dá a partir destas duas matrizes dispostas como na Equação 2.4. Para que esta seja calculada, o vetor força (F) deve ser igualado a zero, assim como se observa na equação 2.10:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [K]\{y\} = 0 \quad 2.7$$

Para vibrações livres da estrutura não amortecida, busca-se soluções para a Equação 2.10, reescrevendo-a como a equação 2.11, vista a seguir:

$$y = a \sin(\omega t - \alpha) \quad 2.8$$

Onde a seria a amplitude do movimento no enésimo grau de liberdade, e variável ω seria a frequência natural de vibração da estrutura.

Escrevendo a Equação 2.11 como vetor, temos então a equação 2.12 abaixo:

$$\{y_i\} = \{a_i\} \sin(\omega t - \alpha), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \dots n \quad 2.9$$

Onde, a_i é a amplitude de movimento da enésima coordenada, ω é a frequência natural e n é o número de graus de liberdade.

Substituindo a Equação 2.12 na Equação 2.10, obtém-se a equação 2.13:

$$- \omega^2 [M] \{a\} \sin(\omega t - \alpha) + [K] \{a\} \sin(\omega t - \alpha) = 0 \quad 2.10$$

Fatorando $\sin(\omega t - \alpha)$ e reorganizando os termos, temos a equação 2.14, vista a seguir:

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{a\} = \{0\} \quad 2.11$$

Que para o caso geral, define-se para n (homogêneo) um sistema algébrico de equações lineares com n deslocamentos desconhecidos (a_i) e um parâmetro desconhecido ω^2 .

A formulação escrita na equação 2.14 é um problema matemático que recebe o nome de autovalor. Sua solução não trivial, ou seja, a solução para a qual nem todo $a_i = 0$ requer que o determinante do fator da matriz de $\{a\}$ seja igual a 1. Neste caso, temos a equação 2.15:

$$[[K] - \omega^2 [M]] = \{0\} \quad 2.12$$

O determinante da matriz resultante da Equação 2.15 resulta em uma equação polinomial de

grau n em w^2 que deve ser satisfeito para n valores de ω^2 . Este polinômio encontrado é conhecido como equação característica do sistema. Cada um desses valores de w^2 , obtidos por meio da resolução da equação característica satisfazem a Equação 2.14, sendo possível resolvê-la para encontrar $a_1, a_2, \dots, a_n$ em termos de uma constante arbitrária.

CAPÍTULO 3 O SOFTWARE

O trabalho em questão trata-se do desenvolvimento de um software, esse processo demanda de escolhas, começando pela linguagem de programação utilizada, compilador preferencial para a utilização do aluno durante o desenvolvimento do trabalho, lógica de programação e bibliotecas que serão utilizadas dentro do *software*.

Uma parte deste processo de escolhas está nesse capítulo, onde pode-se entender um pouco da origem do Python e sua trajetória, além de se explicar o motivo para o uso desta linguagem como a principal utilizada neste trabalho, o compilador preferencial escolhido pela aluna para melhor desempenho do software, e qual biblioteca do Python foi crucial para o desenvolvimento de um trabalho que exige menos processamento do computador que venha a rodar o programa, onde está a base dos cálculos principais do código.

3.1 O QUE É O PYTHON

Python é um *software* livre, ou seja, seus recursos podem ser usados gratuitamente por qualquer pessoa, isso graças ao trabalho da Python Foundation e de inúmeros colaboradores (MENEZES, 2010).

Uma grande vantagem de Python é a facilidade de leitura dos códigos escritos nessa linguagem. Enquanto outras linguagens de programação utilizam inúmeras marcações, como, por exemplo, ponto e vírgula ou ponto no final de cada linha de comando, além de marcadores de início e fim de bloco de comandos, como chaves ou palavras, *begin* e *end*, por exemplo (MENEZES, 2010). A presença de todos esses marcadores torna os programas complicados de ler, e felizmente não são usados em Python, tornando a linguagem mais atrativa para programadores, principalmente para os iniciantes.

Embora usar a linguagem seja algo simples, com uma curva de aprendizado pequena em relação à outras linguagens, o Python é ainda uma linguagem poderosa, podendo ser usada para administrar sistemas e desenvolver grandes projetos (MENEZES, 2010).

3.2 PORQUE O PYTHON?

Além da simplicidade da linguagem, que já foi citada no tópico anterior, o Python é vantajoso pela possibilidade de ser estendido com bibliotecas próprias (que estão vinculadas ao código em sua essência) e uma vasta coleção de bibliotecas e *softwares* de suporte a aplicativos de terceiros que podem ser adicionadas à linguagem após a sua instalação (LUTZ, 2009)

Dentre essas bibliotecas tem-se o SymPy, voltada para cálculos de funções simbólicas (incógnitas). Esta merece um certo destaque nesta monografia, uma vez que o cálculo das frequências naturais só é possível a partir desta biblioteca.

3.3 BIBLIOTECA SYMPY

Ao acessar o site oficial do SymPy, tem-se a seguinte definição: SymPy é uma biblioteca Python para matemática simbólica. O objetivo é se tornar um Sistema de Álgebra Computacional (CAS) completo, enquanto mantém o código o mais simples possível para ser compreensível e facilmente extensível. SymPy é escrito inteiramente em Python.

O projeto SymPy foi criado em 2005, por Ondřej Čertík. O potencial de tal projeto foi reconhecido por mais de 500 pessoas, que contribuíram para a criação do código completo (MEURER et al., 2017).

O SymPy foi projetado com um forte foco na usabilidade como uma biblioteca do Python, mas não faz nenhuma tentativa de estender a própria linguagem Python, na verdade, o objetivo do projeto é que os usuários do SymPy possam incluí-lo ao lado de outras bibliotecas Python em seu fluxo de trabalho, seja em um ambiente interativo ou como uma parte programática em um sistema maior (MEURER et al., 2017).

A SymPy é uma biblioteca leve, pois depende apenas de *mpmath*, uma biblioteca Python pura para aritmética de ponto flutuante arbitrário que resolve integrais, limites, derivadas, matrizes, polinômios, entre outras, (SYMPY DEVELOPMENT TEAM, 2021). A inclusão da biblioteca SymPy no código deste trabalho foi crucial para a realização dos cálculos de edifícios *Shear Building*.

3.4 INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT

Em adição ao exposto, salienta-se que, para otimizar a execução do programa, foi utilizado o IDE (*Integrated Development Environment*), em português, Ambiente de Desenvolvimento

Integrado Spyder. Seu uso é justificado por ser um IDE próprio para Data Science (SPYDER WEBSITE CONTRIBUTORS, 2021), para que assim a compilação do código não exija processamento em demasia, como acontece em outros compiladores.

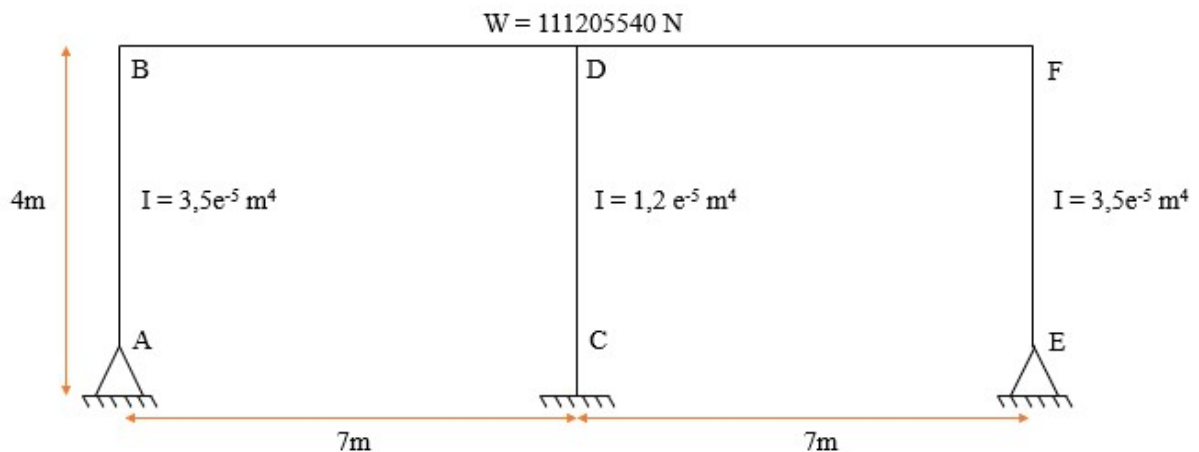
CAPÍTULO 4 ENSAIOS NUMÉRICOS

Para maior entendimento do cálculo de edifícios como *Shear Building*, neste capítulo serão apresentados alguns sistemas hipotéticos que ilustram todo conteúdo apresentado até este momento, nestes exemplos, a frequência natural da estrutura será encontrada a partir da formulação presente no Capítulo 2 deste trabalho.

4.1 SISEMA HIPOTÉTICO COM 1 GRAU DE LIBERDADE

Para visualização do modelo de Shear building, cabe demonstrar o método através de exemplos, pode-se determinar a frequência natural para o movimento horizontal do pórtico da Figura 4.1, considerando $E = 9,34 \cdot 10^{13} \text{ Mpa}$.

Figura 4.1 – Edificação com um grau de liberdade



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Ao observar as forças atuantes em cada coluna, qualquer pessoa que tenha afinidade com estruturas pode deduzir empiricamente o deslocamento presente na Figura 4.2.

A partir do método de *Shear Building* proposto por PAZ (1991), e discriminado no Capítulo 3, podemos resolver tal caso a partir da equação 4.1:

$$-m\ddot{y} - k_1 y - k_2 y - k_3 y = 0$$

4.1

Multiplicando os dois lados da igualdade por “-1” e colocando “y” em evidência, têm-se a equação 4.2, como se observa abaixo:

$$m\ddot{y} + (k_1 + k_2 + k_3) y = 0$$

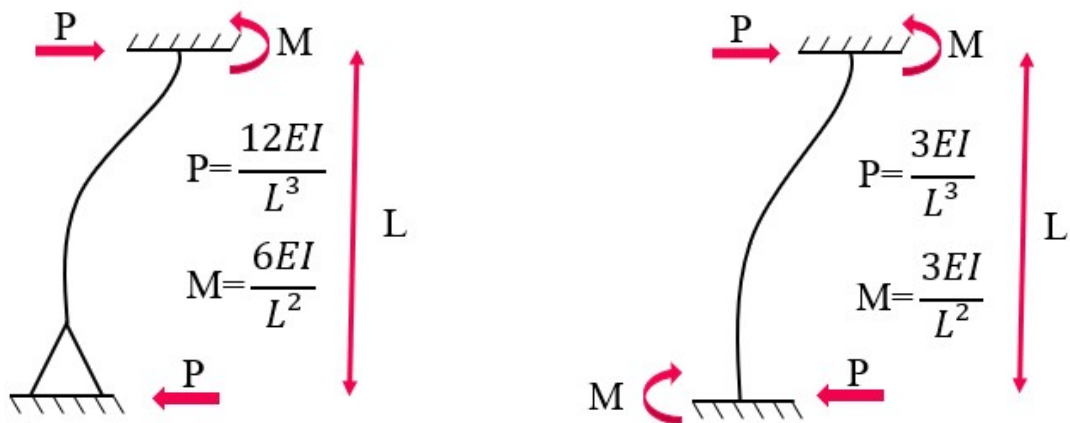
4.2

Para simplificação de cálculos, iremos chamar o resultado da soma $k_1 + k_2 + k_3$ de k_e , obtendo então a equação de movimento 4.3:

$$m\ddot{y} + k_e y = 0$$

4.3

Figura 4.2 – Deslocamentos das vigas do exemplo 1



a) Representação do deslocamento para pilares com um extremo engastado e outro com apoio de segundo grau.

b) Representação do deslocamento para pilares duplamente engastados

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Ainda segundo a formulação proposta por PAZ (1991), têm-se que para as colunas AB e EF, que são colunas com uma extremidade engastada e outra extremidade articulada, a constante k é dada pela Equação 2.1(b). Substituindo com os valores do exemplo, pode-se obter as equações 4.4 e 4.5 para o pilar AB:

$$k_1 = \frac{3 \cdot 9,341 \cdot 10^{13} \cdot 3,4 \cdot 10^{-5}}{4^3}$$

4.4

$$k_1 = 1,49 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

4.5

E para a coluna EF, as equações 4.6 e 4.7 representam a constante k que deve ser encontrada:

$$k_3 = \frac{3 \cdot 9,341 \cdot 10^{13} \cdot 3,5 \cdot 10^{-5}}{4^3} \quad 4.6$$

$$k_3 = 1,49 \cdot 10^8 \text{ N/m} \quad 4.7$$

Já quando se tratando de colunas engastadas em ambas as extremidades, a sua constante pode ser calculada a partir da equação 2.2 Substituindo as constantes pelos valores referentes à coluna CD:

$$k_2 = \frac{3 \cdot 9,34 \cdot 10^{13} \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}}{4^3} \quad 4.8$$

$$k_2 = 2,10 \cdot 10^8 \text{ N/m} \quad 4.9$$

Com os valores de k_1 , k_2 e k_3 definidos, pode-se calcular o valor de ke , representado pelas equações 4.10 e 4.11:

$$ke = 2,10 \cdot 10^8 + 1,49 \cdot 10^8 + 1,49 \cdot 10^8 \quad 4.10$$

$$ke = 5,1 \cdot 10^8 \text{ N/m} \quad 4.11$$

A frequência de uma estrutura pode ser calculada a partir da equação 4.12:

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 4.12$$

Substituindo as constantes com seus respectivos valores, temos então as equações 4.13 e 4.14 como resultado:

$$w = \sqrt{\frac{5,1 \cdot 10^8}{111205540}} \cdot 9,81 \quad 4.13$$

$$w = 6,69 \text{ (1/s)} \quad 4.14$$

Convertendo para Hz (hertz), a unidade de frequência no SI, também conhecida por cps (ciclos por segundo), têm-se então as equações 4.16 a 4.18:

$$f = \frac{w}{2\pi} \quad 4.16$$

$$f = \frac{6,69}{2\pi} \quad 4.17$$

$$f = 1,06 \text{ cps} \quad 4.18$$

A frequência natural da estrutura é 1,06 Hz.

4.2. SISTEMA HIPOTÉTICO COM 2 GRAUS DE LIBERDADE

Há situações onde o sistema possui mais de um grau de liberdade, para esses casos, segundo PAZ (1991) emprega-se uma abordagem matricial, como no exemplo a seguir, que conta com

dois graus de liberdade (Figura 4.3).

Como há neste caso dois graus de liberdade, também possuem dois deslocamentos, que se somam para então ter como resultado o deslocamento final, o que pode ser visto na figura 4.4.

Segundo a formulação proposta por Mario Paz, no seu livro “Dinámica Estructural: Teoría y cálculo” (PAZ, 1991), este caso pode ser resolvido a partir do sistema representado na equação 4.19:

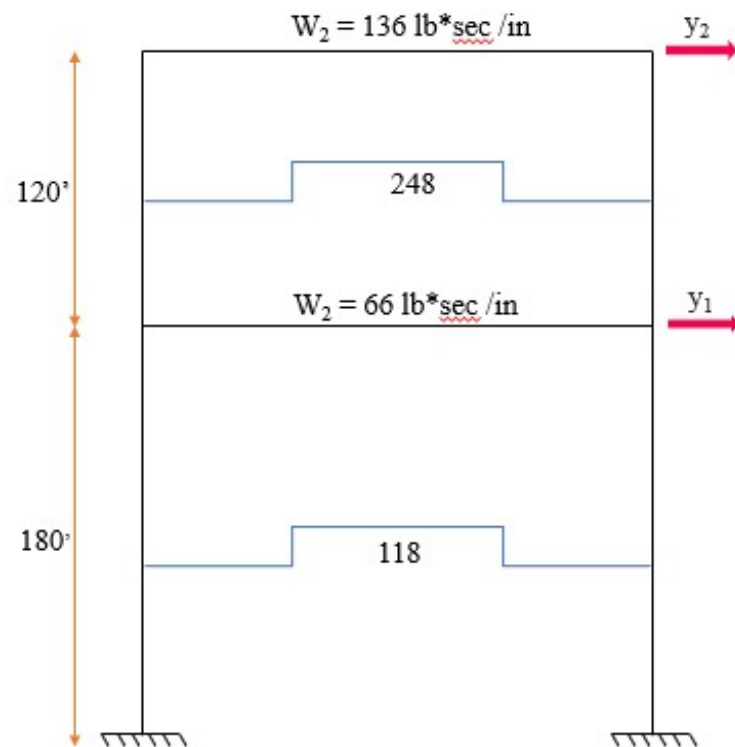
$$\begin{aligned} -m_1 \ddot{y}_1 - k_1 y_1 - k_2 (-y_2 + y_1) &= 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) &= 0 \end{aligned} \quad 4.19$$

Tal sistema pode ser escrito como duas matrizes, seguindo o formato das equações 2.4 e 2.5, onde, respectivamente, $[M]$ é a matriz de massa e $[K]$ a matriz de rigidez, estas podem ser escritas como as equações 4.21 e 4.22, respectivamente:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad 4.21$$

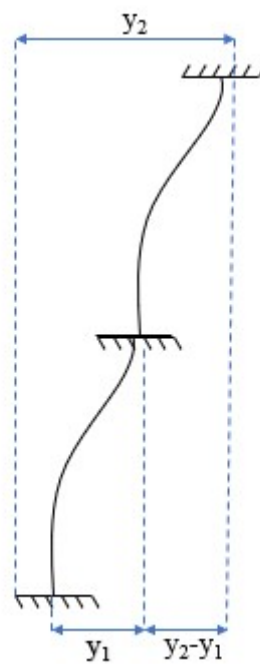
$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad 4.22$$

Figura 4.3 – Edifício com dois graus de liberdade



Fonte: Adaptado de PAZ (2019)

Figura 4.4 – Deformações do exemplo 2



Fonte: Adaptado de PAZ (2019)

Como dito e demonstrado no capítulo anterior, ke é correspondente à soma das constantes elásticas das colunas pertencentes à estrutura em estudo (equação 4.23) tal conceito será igualmente aplicado neste caso. Percebe-se que ambas as colunas engastadas nas suas duas extremidades, então pode-se calcular a constante elástica das colunas utilizando a equação 2.1, substituindo as constantes pelos valores das colunas do primeiro pavimento:

$$ke_1 = \frac{2 \cdot 12 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 248}{180^3} \quad 4.23$$

$$ke_1 = 30,700 \text{ lb} \quad 4.24$$

Agora utilizando-se dos valores dos pilares do segundo pavimento:

$$ke_2 = \frac{2 \cdot 12 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 118}{120^3} \quad 4.25$$

$$ke_2 = 44,300 \text{ lb/in} \quad 4.26$$

Aplicando os resultados na equação 2.15, obtêm-se a seguinte matriz:

$$\begin{vmatrix} ke_1 + ke_2 - m_1 \omega^2 & -ke_2 \\ -ke_2 & k_2 - m_2 \omega^2 \end{vmatrix} = 0$$

A expansão deste determinante dá uma equação quadrática em ω^2 , assim como representado na equação 4.27:

$$m_1 \cdot m_2 \cdot \omega^4 - [(k_1 - k_2) m_2 + m_1 \cdot k_2] + k_1 \cdot k_2 = 0 \quad 4.27$$

Introduzindo os valores numéricos para este exemplo, obtemos a equação 4.28:

$$8976 \omega^4 - 10947800 \omega^2 + 1,36 \cdot 106 = 0 \quad 4.27$$

Tendo então as seguintes frequências:

$$\omega_1 = 11,83 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_2 = 32,89 \text{ rad/sec}$$

CAPÍTULO 5 RESULTADOS OBTIDOS

Como resultado desta monografia, obteve-se um *software* desenvolvido em Pyhon, tendo como ambiente de desenvolvimento Integrado principal o Spyder (*Scientific PYthon Development Environment*).

O *software* resultado deste trabalho retorna ao usuário as matrizes de rigidez e massa de um edifício, e, posteriormente, a frequência natural deste.

Para que os cálculos possam ser feitos, o programa pede que sejam inseridos dados sobre a estrutura, sendo eles: número de andares, número de pilares por andar, momento de inércia dos

pilares, tipos de apoio dos pilares e distância entre pisos.

As informações são divididas por cor, onde as frases em cor marrom são instruções de processo, e as frases em cor branca são perguntas para inserção de dados, as saídas de dados são dadas na cor azul, para assim, o usuário poder se orientar melhor, uma vez que não foi possível programar uma interface gráfica a partir do código desenvolvido.

A lógica usada no código pode ser representada pelo fluxograma dado na Figura 5.2 e Figura 5.3, onde se apresentam soluções diferentes para edifícios com apenas um andar ou para vários andares.

O *software* desenvolvido, é simples, sem uma plataforma gráfica e dependente de compiladores, mas com potencial para ser melhorada com novas funções, otimização, adaptação para um programa com plataforma gráfica (mais interativo e lúdico), e a conversão para um *software* que roda a partir de um executável independente.

Figura 5.1– Visualização do usuário durante a execução do software

```

-----
Vamos começar pelo pilar da extrema esquerda.
No decorrer dos cálculos, vamos caminhar para a direita
Até alcançarmos o pilar da extrema direita
-----

Qual é a distância entre os pisos? 3
Este pilar possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 0

Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 3400
-----
Vamos para o próximo pilar, imediatamente à direita deste último
-----

Qual é a distância entre os pisos? 3
Este pilar possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 1

Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 1600
-----
Vamos para o próximo pilar, imediatamente à direita deste último
-----

Qual é a distância entre os pisos? 3
Este pilar possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 1

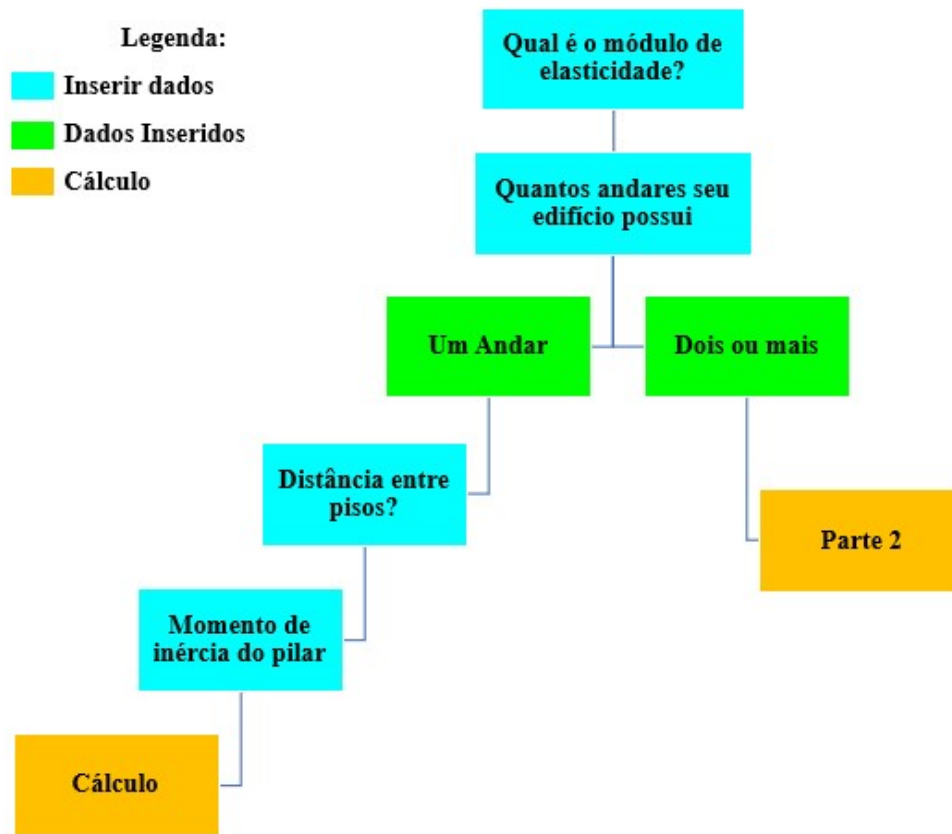
Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 3400

Qual é a massa aplicada neste andar? 25000
-----
Fim dos cálculos!
-----
A frequência natural da sua estrutura é
3192.491190277586

```

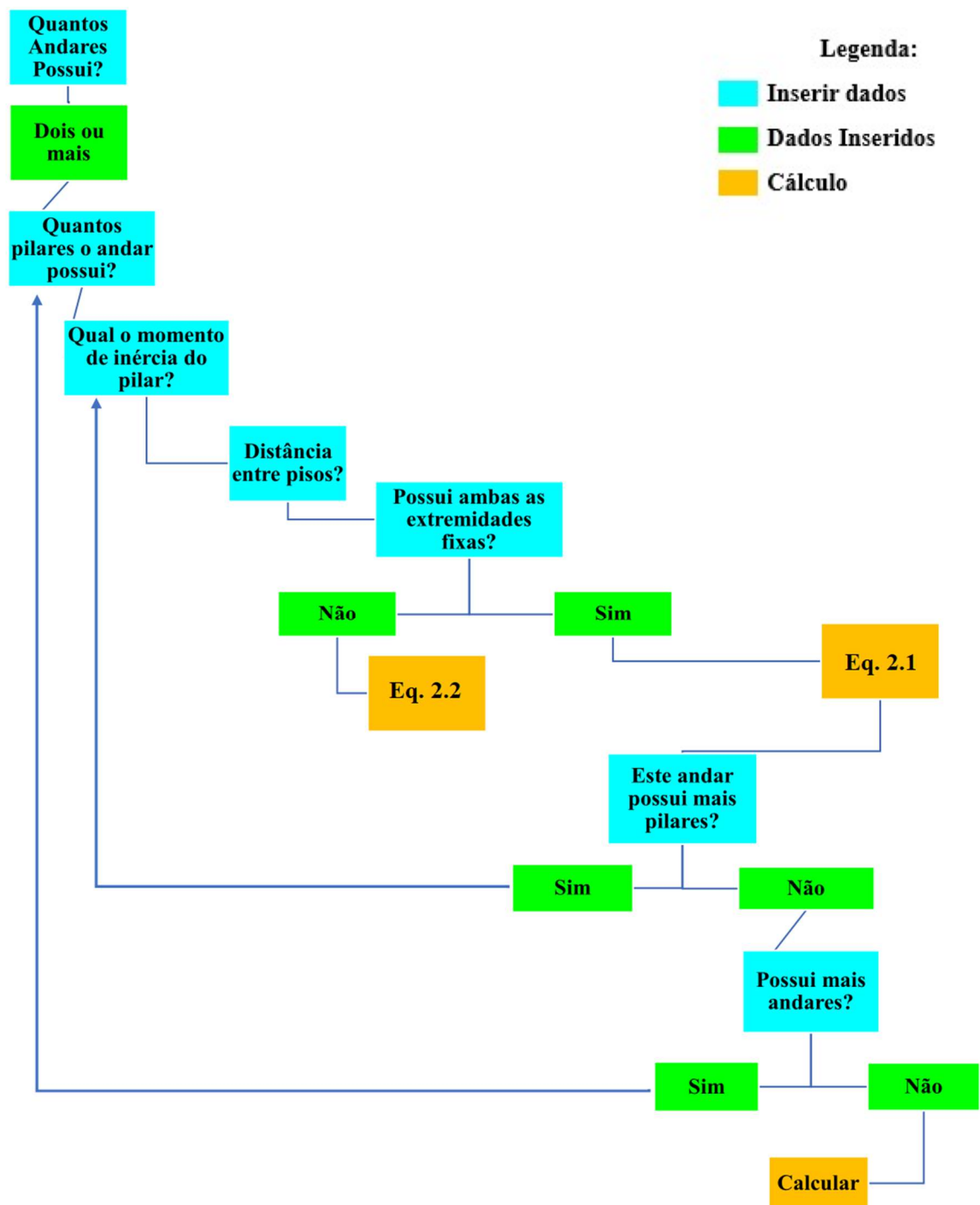
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Figura 5.2– Fluxograma com lógica utilizada no software (Parte 1)



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Figura 5.3– Fluxograma com lógica utilizada no software (Parte 2)



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

5.1. FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA EDIFÍCIOS DE 1 ANDAR

A lógica apresentada no início deste capítulo resulta em duas abordagens diferentes para o problema proposto, sendo a primeira abordagem para estruturas com um andar, ou seja, com um grau de liberdade, a resolução feita pelo software pode ser observada nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6:

Figura 5.4– Resolução do problema hipotético 1 (Parte 1)

```
Olá, saudações!
Este software calcula a frequência natural da sua estrutura
Vamos inserir alguns dados para o cálculo?
-----
ATENÇÃO! Este software não converte unidades!
Se atente às unidades utilizadas, caso haja incompatibilidade, converta-as
Unidades incompatíveis acarretarão em resultados incorretos
-----

Qual é o módulo de elasticidade da estrutura? 9.34e13
Quantos andares seu edifício possui (Incluindo térreo)? 1
Qual a velocidade da gravidade no local? 9.81
Quantos pilares existem neste andar? 3
```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Percebe-se na figura 5.4 que o usuário, nesta abordagem, se depara com instruções que se diferenciam por cores, para indicar valores de entrada e instruções. A visualização se assemelha com o *Prompt* de comando do Windows, uma vez que não foi desenvolvida um código orientado à objetos, porém, intuitivo para o usuário, não se necessita de instruções prévias para que seja possível o uso do programa, as instruções são as mais claras possíveis e trabalha no tempo do usuário, que pode continuar o cálculo quando quiser, desde que não pare a execução do programa.

Na figura 5.5, o programa aborda cada pilar do edifício individualmente, solicitando ao usuário que insira dados sobre pé direito, apoios nas extremidades e momento de inércia, após recolher todas as informações de tais pilares, o software solicita a carga aplicada sobre o andar em questão.

Por último, têm-se o retorno de todos os dados inseridos, com a frequência natural da estrutura

calculada.

Figura 5.5 – Resolução do problema hipotético 1 (Parte 2)

```

-----
Vamos começar pelo pilar da extrema esquerda.
No decorrer dos cálculos, vamos caminhar para a direita
Até alcançarmos o pilar da extrema direita
-----

Qual é a distância entre os pisos? 4
Este pilar possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 0

Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 3.5e-5
-----
Vamos para o próximo pilar, imediatamente à direita deste último
-----

Qual é a distância entre os pisos? 4
Este pilar possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 1

Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 1.2e-5
-----
Vamos para o próximo pilar, imediatamente à direita deste último
-----

Qual é a distância entre os pisos? 4
Este pilar possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 0

Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 3.5e-5

Qual é a massa aplicada neste andar?111205540

```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Figura 5.6 – Resolução do problema hipotético 1 (Parte 3)

```

-----
Fim dos cálculos!
-----
A frequência natural da sua estrutura é
6.7508176030931

```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

5.2. FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA EDIFÍCIOS DE VÁRIOS ANDARES

Assim como na situação do capítulo anterior, logo que se inicia a execução do código, há uma introdução com instruções de como se dá o funcionamento do *software*, tais instruções são o mais sucintas e claras possível.

Após, parte-se para o cálculo, donde o usuário deverá inserir quantos pilares há no andar, pé direito, momento de inércia e carga do piso, assim como se pode ver na imagem 5.7:

Figura 5.7 – Resolução do problema hipotético 2 (Parte 1)

```
-----
Olá, saudações!
Este software calcula a frequencia natural da sua estrutura
Vamos inserir alguns dados para o cálculo?
-----
ATENÇÃO! Este software não converte unidades!
Se atente às unidades utilizadas, caso haja incompatibilidade, converta-as
Unidades incompatíveis acarretarão em resultados incorretos
-----

Qual é o módulo de elasticidade da estrutura? 30e6

Quantos andares seu edifício possui (Incluindo térreo)? 2
-----
Muitos andares, para te situar melhor, vamos começar pelo térreo
Após, iremos subir andar por andar, até o último andar
-----

Quantos pilares existem neste andar? 2

Qual é a distância entre os pisos? 180

Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 248
Vamos começar pelo pilar da extrema esquerda, este possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 1
-----
Vamos para o próximo pilar, imediatamente à direita deste último

Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 248
Agora vamos calcular o pilar da extrema direita, ele possui ambas as extremidades fixas?

Se sim, digite 1, se não, digite 0: 1

Qual é a massa aplicada sobre este andar? 136
-----
-----Vamos para o próximo pavimento-----
-----
```

Figura 5.8 – Resolução do problema hipotético 2 (Parte 2)

```

-----Vamos para o próximo pavimento-----
-----

Quantos pilares existem neste andar?2
Qual é a distância entre os pisos? 120
Qual é o momento de inércia da seção do pilar? 118
Vamos começar pelo pilar da extrema esquerda, este possui ambas as extremidades fixas?
Se sim, digite 1, se não, digite 0: 1
-----Vamos para o próximo pilar, imediatamente à direita deste último-----

Qual é o momento de inércia da seção do pilar?118
Agora vamos calcular o pilar da extrema direita, ele possui ambas as extremidades fixas?
Se sim, digite 1, se não, digite 0: 1
Qual é a massa aplicada sobre este andar? 66
-----
A matriz de massa encontrada é:
-----
[[136.0, 0], [0, 66.0]]
-----
A matriz de rigidez encontrada é:
-----
[[ 79783.95061728 -49166.66666667]
 [-49166.66666667 49166.66666667]]
-----
A matriz de para vibração livre encontrada é:
-----
[[79783.9506172839 - 136.0*w**2, -49166.666666666664], [-49166.666666666664, 49166.66666666667 - 66.0*w**2]]
-----
Fim dos cálculos!
-----
As frequências naturais da sua estrutura são
11.8676915835077 34.5073048374335
-----

```

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Após inserida todas as informações, o *software* retorna os seguintes dados: matriz de massa da estrutura, matriz de rigidez, matriz para vibração livre e frequências naturais da estrutura.

Percebe-se que neste caso a estrutura possui duas frequências naturais, isso acontece devido aos dois graus de liberdade da estrutura, este número cresce juntamente com os graus de liberdade da estrutura em estudo, como se pode observar na imagem 5.8.

CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste Trabalho de Conclusão de Curso, concluiu-se que é possível realizar cálculos para a análise dinâmica de estruturas por meio de *softwares* simples, desenvolvidos na linguagem Python.

Foi possível, a partir de longas pesquisas, mostrar que as cargas dinâmicas atuantes sobre uma edificação, que provêm da própria estrutura, podem ser calculadas a partir de matrizes, a partir de um método conhecido como *Shear Building*, dispensando o cálculo a partir de integrais.

O *software* desenvolvido aparenta ser uma ferramenta de grande utilidade para engenheiros, podendo ser usada nas fases iniciais do dimensionamento de estruturas. Levando em consideração a fala anterior, o objetivo inicial desta monografia foi alcançado, ao menos minimamente, uma vez que o software ainda necessita de um compilador e não possui plataforma gráfica, o que abre um leque de pesquisas a partir deste código.

Esta pesquisa foi de grande importância, pois ao realizá-la, um bom conhecimento de uma linguagem de programação nova foi adquirido, uma vez que a área é sutilmente abordada na grade do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Câmpus Jataí, e que mostrou ser fascinante (programação e desenvolvimento de *software*), podendo ser uma opção de especialização, futuramente.

REFERÊNCIAS

FIGUEIREDO, Arthur Zanchetta De. **Biblioteca Digital do Exército**, c2018. Identificação estrutural de um modelo Shear Building de dois pavimentos. Disponível em: <<https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/7832/1PFC%20-%20Ten%20Zanchetta.pdf>>. Acesso em: 17 Mai 2021.

LOBÃO, Paulo. **MultiPro #LAB**, c2020. As 4 principais etapas de um projeto estrutural. Disponível em: <<https://multiprolab.com/2020/04/15/as-4-principais-etapas-de-um-projeto-estrutural>>. Acesso em: 17 Abr 2021.

LUTZ, Mark. **Learning Python**. 4 ed. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2009.

MENEZES, Nilo Ney Coutinho. **Introdução à Programação com Python: Algoritmos e lógica de programação para iniciantes**. São Paulo: Novatec Editora Ltda., 2010.

MEURER, Aaron et al. **PeerJ Computer Science**, c2017. SymPy: symbolic computing in Python. Disponível em: <<https://peerj.com/articles/cs-103.pdf>>. Acesso em 10 Jan 2022.

PAZ, Mario. **Dinâmica Estrutural: Teoria y cálculo**. 3 ed. Barcelona: Editorial Reverté, 1991.

PAZ, Mario. **Structural Dynamics: Theory and Computation**. 6 ed. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2019.

RIBEIRO, Marcelo Vieira. **Repositório UFOP**, c1998. Formulação matricial da análise dinâmica de estruturas no domínio da frequência. Disponível em <<http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/6660>>. Acesso em: 01 Mai 2021.

ROSA, Giovanni Santa. **Gizmodo Brasil**, c2020. Maioria das pessoas que usa internet no Brasil se conecta exclusivamente pelo celular. Disponível em: <<https://gizmodo.uol.com.br/pesquisatic-domicilios-2019-celular>>. Acesso em: 01 Mai 2021.

SPYDER WEBSITE CONTRIBUTORS. **Spyder**, c2021. Spyder: The Scientific Python Development Environment. Disponível em: <<https://www.spyder-ide.org/>>. Acesso em 02 jan. 2022

SYMPY DEVELOPMENT TEAM. **Sympy**, c2021. Why SymPy. Disponível em: <

<https://www.sympy.org/pt/index.html> >. Acesso em: 4 fev. 2022.

WINKEL, Brian. **Simiode**, c2017. Simplified Multi-Storey Shear Building Model. Disponível em: <<https://www.simiode.org/resources/4044>>. Acesso em: 17 Mai. 2021.