



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Aniele Taiza de Sousa

Projeto de estruturas resistentes a sismos: análise de zona sísmica e quantidade de pavimentos no método das forças horizontais equivalentes

PAU DOS FERROS - RN

2024

Aniele Taiza de Sousa

Projeto de estruturas resistentes a sismos: análise de zona sísmica e quantidade de pavimentos no método das forças horizontais equivalentes

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros – CMPF, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra.

PAU DOS FERROS - RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725p Sousa, Aniele Taiza de.
 Projeto de estruturas resistentes a sismos:
 análise de zona sísmica e quantidade de
 pavimentos no método das forças horizontais
 equivalentes / Aniele Taiza de Sousa. – 2024.
 56 f. : il.

 Orientador: Paulo Henrique Araújo Bezerra.
 Monografia (graduação) – Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
 2024.

 1. sismo. 2. zona sísmica. 3. forças horizontais
 equivalentes. I. Bezerra, Paulo Henrique Araújo ,
 orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Aniele Taiza de Sousa

Projeto de estruturas resistentes a sismos: análise de zona sísmica e quantidade de pavimentos no método das forças horizontais equivalentes

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros – CMPF, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

DATA DA APROVAÇÃO: 23/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra - UFRSA
Presidente

Prof. Dr. Sharon Dantas da Cunha - UFRSA
Examinador

Prof. Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva - UFRSA
Examinador

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Ana Maria e Antônio Hildo.
À minha irmã, Alice Thayná.
Aos meus avós, Maria Ana (in memoriam) e
Severino Francisco (in memoriam) e a toda
minha família.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado, concedendo-me saúde, força e sabedoria para enfrentar cada desafio. A Ele devo tudo o que sou e tudo o que conquistei.

À minha família, expresso minha profunda gratidão por estar sempre presente me apoiando, incentivando e por me ensinar que o caminho nem sempre é fácil, mas vale a pena lutar em todos os momentos.

Agradeço especialmente à minha mãe, Ana Maria, cuja presença incansável em todos os momentos da minha vida foi essencial para que eu chegasse até aqui. Sua força, dedicação e amor foram fundamentais para a realização deste sonho.

Ao meu namorado, agradeço pela paciência, pelo suporte emocional e por acreditar em mim nos momentos de incerteza.

Aos meus amigos e amigas, sou grata por acreditarem no meu potencial e por estarem sempre ao meu lado, oferecendo incentivo e apoio nas mais diversas situações. Em especial a Agda Maria e Natalia Kelly, cuja companhia tornou essa caminhada muito mais leve e significativa.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador, Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra, por me guiar durante a fundamentação e construção deste trabalho, por toda dedicação, paciência e confiança.

Aos membros da banca avaliadora Prof. Matheus Fernandes de Araújo Silva e Prof. Sharon Dantas da Cunha, por aceitarem o convite para compor este momento e pelas valiosas contribuições para este trabalho.

Agradeço a todos os meus professores, que ao longo da minha trajetória acadêmica compartilharam seus conhecimentos e experiências, contribuindo de forma significativa para a minha formação. Cada ensinamento foi essencial para que eu chegasse a esta etapa com confiança e preparo.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta etapa tão importante da minha vida, mesmo que seus nomes não estejam aqui mencionados. Saibam que cada gesto e palavra de apoio foram essenciais para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos dos sismos sobre as edificações no Brasil, por meio de uma análise quantitativa utilizando o Método das Forças Horizontais Equivalentes descrito na ABNT NBR 15421:2023. Para isso, foi desenvolvido um código computacional no software Excel®, que considera variáveis como zonas sísmicas, classes de terreno e número de pavimentos. Com base nesse modelo, foram realizados cálculos para um edifício hipotético, variando o número de pavimentos e a zona sísmica, e analisando parâmetros como a força horizontal resultante, o momento de tombamento e a força no último pavimento. Evidenciou-se, por meio dos resultados que o coeficiente de resposta sísmica é um dos fatores que impactam tanto a força horizontal total quanto a força máxima no último pavimento. A força horizontal resultante varia conforme o número de pavimentos e a intensidade sísmica, com a zona 4 apresentando os maiores valores e a zona 0, os menores. O momento de tombamento aumentou com a altura da edificação, chegando a 34% a mais para uma edificação de 40 pavimentos na zona 4 em comparação com as zonas 0, 1 e 2. A força máxima no último pavimento foi mais intensa em edificações de até 3 pavimentos, estabilizando-se em valores quase constantes à medida que a altura aumentava. Os resultados ressaltam a importância de um dimensionamento estrutural adequado, especialmente em áreas de maior atividade sísmica, para garantir a estabilidade e segurança das construções.

Palavras-chave: sismo; zona sísmica; forças horizontais equivalentes.

ABSTRACT

This work aims to analyze the effects of earthquakes on buildings in Brazil, through a quantitative analysis using the Equivalent Horizontal Forces Method described in ABNT NBR 15421:2023. For this, a computational code was developed in Excel® software, which considers variables such as seismic zones, terrain classes and number of floors. Based on this model, calculations were carried out for a hypothetical building, varying the number of floors and the seismic zone, and analyzing parameters such as the resulting horizontal force, the tipping moment and the force on the top floor. It was evident from the results that the seismic response coefficient is one of the factors that impact both the total horizontal force and the maximum force on the top floor. The resulting horizontal force varies depending on the number of floors and the seismic intensity, with zone 4 presenting the highest values and zone 0, the lowest. The tipping moment increased with the height of the building, reaching 34% more for a 40-story building in zone 4 compared to zones 0, 1 and 2. The maximum force on the top floor was more intense in buildings up to 3 floors, stabilizing at almost constant values as the height increased. The results highlight the importance of adequate structural design, especially in areas of greater seismic activity, to guarantee the stability and safety of buildings.

Keywords: earthquake; seismic zone; equivalent horizontal forces.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As camadas da terra	17
Figura 2 - Ondas primárias e secundárias.....	19
Figura 3 - Ondas de Rayleigh e Love.	20
Figura 4 - Zonas sísmicas do Brasil.	25
Figura 5 - Dimensionamento pilares.	36
Figura 6 - Planta de fôrma.	37
Figura 7 - Modelagem 3D da edificação hipotética.	38
Figura 8 - Visualização da interface para análise da força horizontal total.....	40
Figura 9 - Distribuição horizontal das forças.	45
Figura 10 - Força horizontal total na edificação.....	46
Figura 11 - Valores de coeficiente de resposta sísmica.	50
Figura 12 - Somatório do momento de tombamento.....	51
Figura 13 - Força máxima aplicada no último pavimento.....	53
Figura 14 - Coeficiente de distribuição vertical e a força no último pavimento.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala Richter.	21
Tabela 2 - Escala Mercalli Modificada.	22
Tabela 3 - Zonas sísmicas.	26
Tabela 4 - Classe do terreno.	26
Tabela 5 - Fatores de amplificação sísmica no solo.	27
Tabela 6 - Categorias de utilização e fatores de importância de utilização.	28
Tabela 7 - Categoria sísmica.	29
Tabela 8 - Coeficientes de projeto para os diversos sistemas básicos sismorresistentes.	31
Tabela 9 - Coeficientes de limitação do período.	32
Tabela 10 - Peso próprio por pavimento.	39

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Geral	16
2.2 Específicos	16
3 REVISÃO TEÓRICA.....	17
3.1 Estrutura interna do planeta terra	17
3.2 Placas tectônicas	18
3.3 Sismo	19
3.4 Medindo os terremotos.....	20
3.4.1 Escala Richter	20
3.4.2 Escala Mercalli	21
3.5 Histórico dos terremotos	23
3.5.1 Mundial.....	23
3.5.2 No Brasil.....	23
3.6 Norma brasileira para projeto de estruturas resistentes a sismos – ABNT NBR 15421:2023.....	24
3.6.1 Zoneamento sísmico	25
3.6.2 Classes dos terrenos.....	26
3.6.3 Espectro de resposta de projeto	27
3.6.4 Categorias de utilização e fatores de importância de utilização	28
3.6.5 Categoria sísmica.....	29
3.6.6 Força horizontal total.....	30
3.6.7 Determinação do período.....	32
3.6.8 Distribuição vertical das forças sísmicas.....	33
4 METODOLOGIA.....	34
4.1 Análise bibliográfica.....	34

4.2	Caracterização da edificação e aspectos do modelo simulado.....	35
4.2.1	Descrição da edificação.....	35
4.2.2	Pré-dimensionamento dos elementos estruturais	35
4.3	Análise do método das forças horizontais equivalentes	39
4.4	Força horizontal resultante na base.....	42
4.5	Momento de tombamento	42
4.6	Força máxima no último pavimento	43
5	RESULTADOS	45
5.1	Análise da força horizontal resultante.....	46
5.2	Análise do somatório do momento de tombamento	51
5.3	Análise da força máxima no último pavimento	52
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
6.1	Propostas para trabalhos futuros.....	55
REFERÊNCIAS		57

1. INTRODUÇÃO

Os sismos são tremores intensos do solo causados pela chegada de ondas elásticas geradas em profundidade após rupturas e movimentos bruscos relativos entre dois blocos litosféricos, resultando em uma liberação instantânea de energia elástica que havia se acumulado lentamente. Geralmente, os sismos são seguidos por tremores menores, chamados de réplicas, cujo número diminui com o tempo, e após o término dos terremotos, a energia começa a se acumular novamente até atingir o limiar de ruptura, provocando novas liberações bruscas de energia (POMEROL *et al.*, 2013, p. 232).

A preocupação formal com sismos no Brasil é relativamente recente, evidenciado pelo fato de que, apesar da existência de alguns dados históricos esparsos, foi somente na década de 70 que se iniciou o registro sistemático de sismos, com a instalação de estações sismográficas em várias regiões do país. Segundo Silva *et al.* (2021), o Brasil está localizado no centro da Placa Sul-Americana, resultando em atividade sísmica geralmente baixa em comparação com países vizinhos, que estão localizados próximos dos limites territoriais das bordas dessa placa tectônica. No entanto, Silva *et al.* (2021) também argumenta que é equivocado pensar que abalos sísmicos não ocorrem com frequência no país.

Nos últimos anos, a população brasileira tem experimentado um aumento significativo, resultando em uma crescente escassez de espaço e um aumento na presença de obras de grande porte na paisagem urbana. Dada a magnitude dessas construções, é fundamental dedicar uma atenção especial à sua vulnerabilidade aos fenômenos naturais. Portanto, ao construir em áreas suscetíveis a terremotos, é crucial projetar as estruturas de forma a considerar as cargas provenientes dos sismos, garantindo que não sejam comprometidas ou ocorra o desabamento, o que demanda cuidados especiais tanto no dimensionamento quanto na execução das construções (NÓBREGA & NÓBREGA, 2016).

Considerando os severos impactos destrutivos dos terremotos e suas significativas perdas, emergiram ferramentas destinadas a preparar a sociedade e a engenharia para lidar com sismos de maior potencial destrutivo, visando mitigar tais consequências e promover um ambiente mais seguro. Uma dessas ferramentas disponíveis ao meio técnico é a ABNT NBR 15421:2023 – Norma Brasileira de Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos, no ano de 2023. A norma em questão foi desenvolvida com o objetivo de estabelecer critérios para avaliar a segurança e quantificar os efeitos sísmicos sobre as estruturas encontradas na construção civil.

Entretanto, nos cursos de engenharia no território brasileiro, o tema de estruturas resistentes a sismos é pouco abordado, resultando em engenheiros despreparados para lidar com esses desafios. No país, essa questão ainda não é tratada como prioridade, apesar das regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste já terem sido afetadas por terremotos que comprometeram diversas edificações. Portanto, é essencial aplicar conhecimentos técnicos e seguir as normas vigentes para construir estruturas seguras. Além disso, é crucial entender o comportamento das forças atuantes nesses fenômenos, que podem causar grandes consequências para a população afetada.

Neste trabalho, pretende-se identificar maneiras de considerar a ação de um sismo sobre as edificações, contribuindo para a compreensão da estabilidade das construções diante de sismos e garantindo a proteção da vida humana ao diminuir os efeitos sobre as estruturas.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar os efeitos dos sismos em estruturas, especificamente através de uma análise quantitativa do método das forças horizontais equivalentes.

2.2 Específicos

- Estudar e compreender conceitos e considerações da norma Brasileira ABNT NBR 15421: 2023;
- Analisar o método quantitativo das forças horizontais equivalentes descrito na norma ABNT NBR 15421: 2023;
- Aplicar o método das forças horizontais equivalentes através de caso hipotético, considerando diferentes zonas sísmicas;
- Verificar e comparar diferentes casos da edificação, variando o número de pavimentos, por meio da análise da força horizontal total, do momento de tombamento e da força aplicada no pavimento superior.

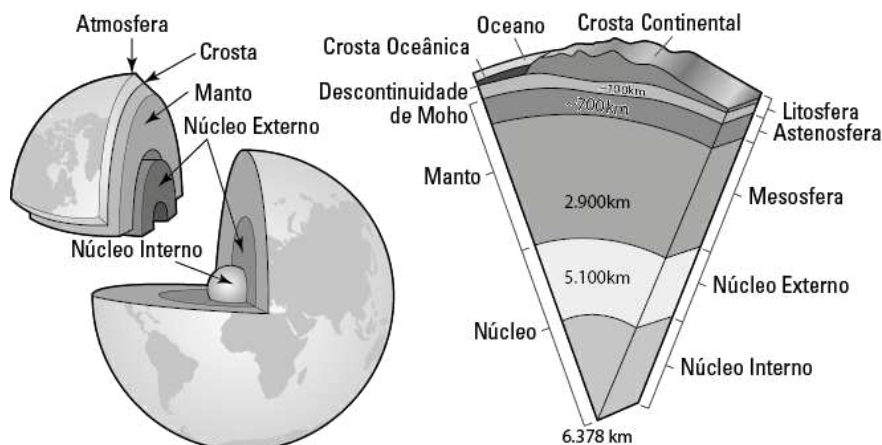
3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 Estrutura interna do planeta terra

A Terra é um planeta dinâmico que tem passado por mudanças contínuas ao longo dos últimos 4,6 bilhões de anos, incluindo alterações nas dimensões, formas e distribuições geográficas dos continentes e das bacias oceânicas (WICANDER; MONROE, 2017). A composição da atmosfera tem evoluído, e as formas de vida atuais diferem daquelas que existiram no passado. As erupções vulcânicas e os terremotos revelam uma atividade interior constante, e as rochas dobradas e fraturadas são testemunhas desta dinâmica colossal dentro da Terra.

O planeta Terra é constituído por três camadas: crosta, manto e núcleo, conforme ilustrado na Figura 1. Esta divisão é resultado das diferenças de densidade entre as camadas, que são determinadas por variações na composição, temperatura e pressão (POMEROL *et al.*, 2013).

Figura 1 - As camadas da terra



Fonte: Spooner, 2022.

A primeira camada que cobre a Terra é a crosta, a qual se divide em dois tipos: continental e oceânica. A crosta continental é mais espessa, variando de aproximadamente 19 km nas áreas mais finas a até 72 km nas regiões montanhosas, composta principalmente por granitos. Em contraste, a crosta oceânica é significativamente mais fina, com cerca de 8 km de espessura, composta por rochas silicáticas densas como basalto e gabro (POPP, 2017).

Os materiais do manto terrestre combinam elementos leves, como sílica e oxigênio, com elementos mais pesados, como ferro e magnésio. Além disso, o manto é dividido em duas camadas principais: a mesosfera e a astenosfera. A mesosfera, que está localizada no manto inferior ao redor do núcleo externo, mantém-se sólida devido às intensas pressões, apesar das altas temperaturas, que variam de 1.648°C a 4.426°C (WICANDER; MONROE, 2017). Por outro lado, conforme observado por Wicander e Monroe (2017), na astenosfera, localizada na parte superior do manto, as rochas sólidas fluem de maneira semelhante a um líquido espesso, demonstrando um fenômeno conhecido como fluxo plástico, o que confere maleabilidade a essa camada.

No centro da Terra encontra-se o núcleo, que os cientistas, com base em experimentos e interpretações laboratoriais, acreditam ser composto por elementos de metais pesados, como níquel e ferro, dividido em núcleo interno e externo. O núcleo interno é provavelmente sólido e começa a aproximadamente 5.150 km da superfície, enquanto o núcleo externo, uma camada líquida, inicia a cerca de 2.890 km dentro da Terra, conforme revelado por estudos de ondas sísmicas e zonas de sombra (SPOONER, 2022).

3.2 Placas tectônicas

A teoria das placas tectônicas, elaborada no século XX, fundamenta-se em diversas hipóteses que explicam como as grandes estruturas da superfície terrestre, conhecidas como placas tectônicas ou litosféricas, são formadas por movimentos no interior da Terra (DUARTE, 2019).

O movimento das placas, impulsionado pela astenosfera, resulta em separações, colisões ou deslizamentos umas ao lado das outras. Para Silva e Crispim (2019), os movimentos podem ser classificados como divergentes, onde as placas se afastam e formam novas crostas oceânicas; convergentes, quando se movem uma contra a outra; ou conservativos, onde as placas deslizam por tensão lateralmente uma em relação à outra, sem destruição ou geração de crosta oceânica ou continental.

As regiões com maiores probabilidades de sofrer terremotos são aquelas onde ocorrem encontros entre placas tectônicas. Essas áreas, chamadas de regiões interplacas, apresentam uma alta concentração de eventos sísmicos nas bordas das placas, o que resulta em uma maior concentração de estudos nesses locais, especialmente em países desenvolvidos (JUSTINO, 2022).

3.3 Sismo

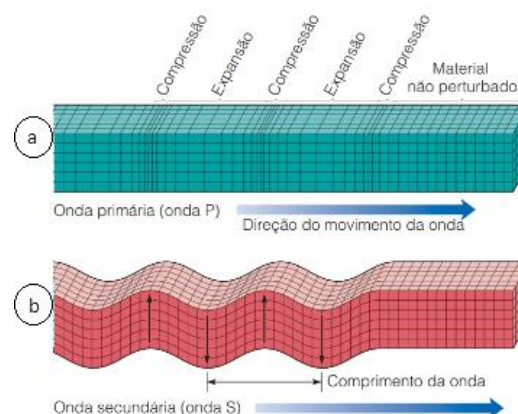
Um sismo, também conhecido como terremoto ou tremor de terra, é o resultado da ruptura repentina de uma falha ou fratura geológica, gerando vibrações que se propagam em todas as direções. As rupturas ocorrem devido ao acúmulo de tensões no interior da Terra, principalmente causadas pelo movimento das placas tectônicas (WICANDER; MONROE, 2017).

O ponto onde a ruptura inicia é chamado de foco ou hipocentro, e sua projeção na superfície é conhecida como epicentro. De acordo com Souza (2017), a relação entre o hipocentro e os danos causados é inversa, ou seja, quanto mais profundo estiver o hipocentro, menores serão os danos na superfície. Souza (2017) também destaca que o epicentro é o local diretamente acima do hipocentro na superfície terrestre e que, para estimar esses pontos, utiliza-se uma equação que compara as intensidades observadas com a variação de intensidade em relação à distância e magnitude.

Durante um terremoto, são gerados diversos tipos de ondas, incluindo as ondas primárias ou de compressão (P), as ondas secundárias, transversais ou cisalhantes (S), e as ondas de superfície (NASCIMENTO, 2014).

As ondas P causam vibrações nas camadas na mesma direção da propagação das ondas transversais, levando a um processo de contração e expansão das camadas na direção horizontal (Figura 2 a). No caso das ondas S, as camadas vibram perpendicularmente à direção de propagação das ondas sísmicas, resultando em rápidas oscilações verticais (Figura 2 b). As ondas P se movem mais rapidamente do que as ondas S, o que faz com que cheguem primeiro a um local, enquanto as ondas S chegam depois (QUEIROZ, 2016).

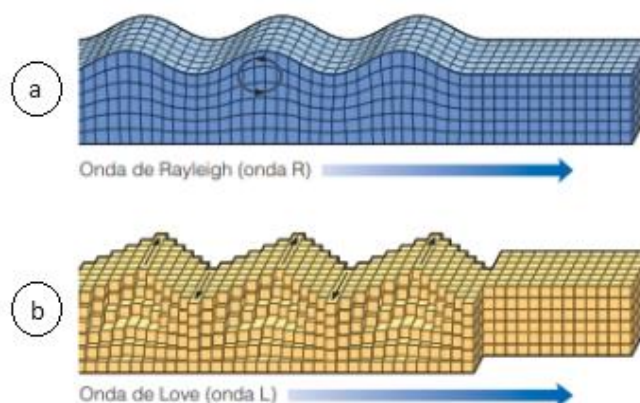
Figura 2 - Ondas primárias e secundárias.



Fonte: Adaptado de Wicander & Monroe, 2017.

Os sismólogos identificam vários tipos de ondas de superfície, sendo as mais importantes as ondas de Rayleigh e as ondas de Love. As ondas de Rayleigh (ondas R) fazem com que as partículas de material se movam em trajetórias elípticas dentro de um plano vertical na direção da propagação da onda (Figura 3 a). Por outro lado, as ondas de Love (ondas L), semelhantes às ondas S, fazem com que as partículas se movam apenas para frente e para trás em um plano horizontal perpendicular à direção da onda (Figura 3b).

Figura 3 - Ondas de Rayleigh e Love.



Fonte: Adaptado de Wicander & Monroe (2017).

3.4 Medindo os terremotos

3.4.1 Escala Richter

A escala de magnitude local, conhecida como escala de Richter, foi desenvolvida por Charles Richter, com a colaboração de Beno Gutenberg, em 1935, sendo um sistema de medição utilizado para quantificar a magnitude de um terremoto com base em sua manifestação na superfície (FRANÇA, 2021). Segundo Spooner (2022), a escala Richter é uma escala logarítmica, o que significa que cada unidade na escala representa uma magnitude dez vezes maior que a do valor anterior. Por exemplo, um terremoto de magnitude quatro na escala Richter possui dez vezes a energia de um terremoto de magnitude três e cem vezes a de um terremoto de magnitude dois.

A princípio, a escala Richter não apresenta limitações significativas. No entanto, como até hoje não foram registrados terremotos com magnitude igual ou superior a 10 — sendo o maior terremoto já documentado o ocorrido no Chile em 1960, com uma magnitude de 9,5 —,

a escala é considerada usualmente para variações entre 0 e 9 graus. De acordo com Spooner (2022), uma limitação da escala Richter é a sua capacidade de medir com precisão tremores de grandes magnitudes, ou seja, terremotos com magnitudes superiores a 7 na escala Richter frequentemente demonstram características semelhantes, o que dificulta a distinção precisa entre eventos de magnitude muito alta. Além disso, tremores com grau superior a 6 são considerados graves, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1- Escala Richter.

Escala Richter	Efeitos do sismo
0,0 – 1,9	Não é sentido. O tremor de terra pode apenas ser detectado por sismógrafos.
2,0 – 2,9	Não é sentido, no entanto objetos pendurados podem balançar.
3,0 – 3,9	Comparável à vibração de um caminhão passando próximo.
4,0 – 4,9	Pode quebrar janelas e derrubar objetos pequenos ou desequilibrados.
5,0 – 5,9	Ocasiona pequenos danos em edificações. A mobília se move e o reboco da parede cai.
6,0 – 6,9	Dano a construções fortes, dano severo a construções fracas.
7,0 – 7,9	Terremoto de grande proporção. Prédios saem das fundações; rachaduras surgem na terra; tubulações subterrâneas se quebram.
8,0 – 8,9	Terremoto muito forte. Pontes se rompem; poucas construções resistem de pé. Não há um limite para a escala, mas, de 8 graus em diante, os efeitos devastadores são sentidos em um raio de centenas de quilômetros.
>9,0	Destruição quase total; ondas se movendo na terra são visíveis a olho nu.

Fonte: Adaptado de Dantas, 2013.

3.4.2 Escala Mercalli

Antes da introdução dos instrumentos modernos para a medição de terremotos, a avaliação do tamanho dos sismos era baseada no dano causado ao terreno e às estruturas, bem como na gravidade do tremor. Esses efeitos na superfície serviam como indicadores da intensidade do terremoto. A Escala de Mercalli Modificada de Intensidade (MMI), com graus que variam de I a XII, de acordo com seus impactos sobre as pessoas, estruturas e o meio ambiente. Esta escala foi desenvolvida em 1902 e passou por modificações em 1931 (CHRISTOPHERSON; BIRKELAND, 2017).

Segundo Wicander e Monroe (2017), embora grandes terremotos geralmente apresentem intensidades mais altas, fatores como distância do epicentro, profundidade do foco,

densidade populacional, geologia local, tipo de construção e duração da agitação também influenciam a intensidade do sismo. A Tabela 2 resume a descrição dos principais efeitos dos terremotos segundo a escala Mercalli Modificada.

Tabela 2 - Escala Mercalli Modificada.

Grau	Descrição dos efeitos
I	Não sentido, a não ser por poucos, em condições especialmente favoráveis.
II	Sentido por apenas algumas pessoas em repouso, especialmente nos pisos superiores dos edifícios.
III	Sentido de modo perceptível dentro de casa, especialmente nos andares superiores de edifícios, mas muitas pessoas não o reconhecem como um terremoto. Automóveis estacionados podem balançar um pouco.
IV	Durante o dia, sentido dentro de casa por muitos, ao ar livre por poucos. À noite, alguns são despertados. Sensação igual à de caminhões pesados colidindo em edifício, automóveis parados balançados perceptivelmente.
V	Sentido por quase todos, muitos são despertados. Alguns pratos, janelas etc. quebrados, alguns casos de gesso rachado. Perturbação, às vezes, notável de árvores, postes e outros objetos altos.
VI	Sentido por todos, muitos assustados e correndo ao ar livre. Alguns móveis pesados movidos. Alguns exemplos de revestimento de gesso caído ou chaminés danificadas. Danos leves.
VII	Todos correm para fora. Danos insignificantes em edifícios de bom projeto e construção; danos leves a moderados em estruturas comuns bem construídas; consideráveis em estruturas mal construídas ou mal projetadas; algumas chaminés rompidas. Percebido por pessoas dirigindo automóveis.
VIII	Danos leves em estruturas especialmente projetadas, consideráveis em edifícios normalmente construídos, com possível colapso parcial; grandes, em estruturas mal construídas. Queda de chaminés, monumentos, paredes. Móveis pesados tombam. Areia e lama expelidas em pequenas quantidades.
IX	Danos consideráveis em estruturas especialmente projetadas. Edifícios deslocados de suas fundações. O solo é perceptivelmente rachado. Tubos subterrâneos quebrados.
X	Algumas estruturas de madeira bem construídas destruídas; a maioria das estruturas de alvenaria e armação com fundações destruídas; solo seriamente rompido. Trilhos dobrados. Deslizamentos de terra consideráveis em margens de rios e encostas íngremes. Água esparramada sobre as margens dos rios.
XI	Poucas estruturas, ou nenhuma, permanecem em pé. Pontes destruídas. Fissuras largas no solo. Tubulações subterrâneas completamente fora de serviço.
XII	Danos totais. Ondas são vistas na superfície do solo. Objetos são jogados para o ar.

Fonte: Adaptado de U.S. Geological Survey *apud* Wicander; Monroe, 2017.

3.5 Histórico dos terremotos

3.5.1 Mundial

O terremoto de Lisboa, ocorrido em novembro de 1755, foi um dos primeiros a serem analisados cientificamente e foi seguido por um tsunami que praticamente destruiu a cidade. Após o desastre, a ciência europeia se dispersou e passou a focar no estudo desses fenômenos, levando ao desenvolvimento de projetos de edifícios resistentes a terremotos. No ano de 1880 foram desenvolvidos os primeiros sismógrafos, e em 1889, na Alemanha, na cidade de Potsdam, foi realizada a primeira associação segura entre um sismograma e um terremoto distante, que havia ocorrido no Japão em 18 de abril (VITORIO, 2022).

O terremoto mais intenso já registrado ocorreu no Chile, em 1960, com 9,5 de magnitude na escala de Richter. Este evento causou a morte de mais de duas mil pessoas e gerou extensos prejuízos materiais. O terremoto também provocou um tsunami que atravessou o Oceano Pacífico e atingiu o Japão. Ademais, o segundo terremoto mais forte já registrado aconteceu em 1964, no Alasca, Estados Unidos, com uma magnitude de 8,9 na escala Richter. Os efeitos do tremor foram intensamente sentidos em várias cidades americanas.

No século XXI, o tremor mais forte ocorreu na Indonésia em 2004, com magnitude de 9,1 na escala Richter, resultando na morte de 160 mil pessoas devido ao epicentro no oceano, que gerou um grande tsunami que surpreendeu a todos (NETO, 2017). Outro grande terremoto, de magnitude 8,9 na escala Richter, ocorreu no Japão em 2011, com epicentro cerca de 130 km de Sendai, gerando um tsunami de até 10 metros e tremores secundários, resultando em uma catástrofe (NETO, 2017).

3.5.2 No Brasil

De acordo com França (2021), o Brasil está situado no interior da Placa Sul-Americana, com sua costa leste distante da borda da placa e a maior parte de seu território centralizada dentro dessa placa. Além disso, a Placa Sul-Americana é a menor das sete grandes placas da litosfera, com cerca de 32 milhões de km², tem sua borda oeste em convergência com a Placa de Nazca, que é responsável pelos abalos sísmicos na região da Cordilheira dos Andes.

Embora o Brasil esteja localizado em uma região com baixa atividade sísmica em comparação com outras partes do mundo, como a região do Pacífico, ainda há a ocorrência de terremotos e atividades sísmicas. Contudo, esses eventos podem ser potencialmente danosos se

ocorrerem perto de centros urbanos e grandes obras de engenharia. Os maiores sismos registrados no país ocorreram em áreas com baixa densidade populacional, o que limitou os danos causados. As estações sismológicas espalhadas pelo território nacional detectam diariamente abalos sísmicos de pequena e média magnitude.

A grande maioria dos sismos têm magnitudes inferiores a 3,0 na escala Richter, de modo que não são percebidos pela população. No entanto, já foram registrados terremotos de importância considerável, como o ocorrido em 1955 no Estado de Mato Grosso, onde a magnitude do sismo alcançou 6,6 na escala Richter (NETO, 2017). Esse evento aconteceu em uma região pouco habitada, resultando em poucos danos materiais e humanos.

Apesar disso, em 1986, o Brasil experimentou um evento sísmico significativo na cidade de João Câmara, no Estado do Rio Grande do Norte, com um terremoto de magnitude 5,1 na escala Richter. Esse abalo causou danos às edificações, resultando na necessidade de reconstrução ou recuperação de 4.348 imóveis e deixando milhares de desabrigados (MATA, 2018). O elevado número de imóveis danificados por um sismo de intensidade moderada pode ser atribuído ao baixo padrão construtivo dessas edificações. Além disso, a profundidade reduzida da falha de Samambaia contribuiu para o potencial destrutivo do sismo.

3.6 Norma brasileira para projeto de estruturas resistentes a sismos – ABNT NBR 15421:2023

A primeira edição da norma brasileira ABNT NBR 15421, que trata do projeto de estruturas resistentes a sismos, foi publicada em 2006. Inicialmente considerada uma temática complexa e restrita a projetos específicos no início dos anos 2000, a norma tem se difundido de forma progressiva e significativa em trabalhos acadêmicos e projetos contemporâneos.

De acordo com Nóbrega *et al.* (2022), dois fatores contribuem para o menor conhecimento e disseminação da NBR 15421. O primeiro fator é que a norma exclui a aplicação em diversas estruturas especiais, como obras hidráulicas, arcos, silos, tanques, chaminés, torres, estruturas offshore ou aquelas que utilizam técnicas construtivas não convencionais. O segundo fator é a isenção de seus requisitos para as estruturas localizadas na zona sísmica "0", que abrange cerca de 80% do território nacional.

Atualmente, o texto da NBR 15421 foi revisado e publicado oficialmente em sua 2ª edição, no ano de 2023. Segundo Nóbrega *et al.* (2022), a NBR 15421:2023 sofreu duas principais modificações, que foram as correções no mapa de perigo sísmico e os ajustes no formato do espectro de resposta de projeto.

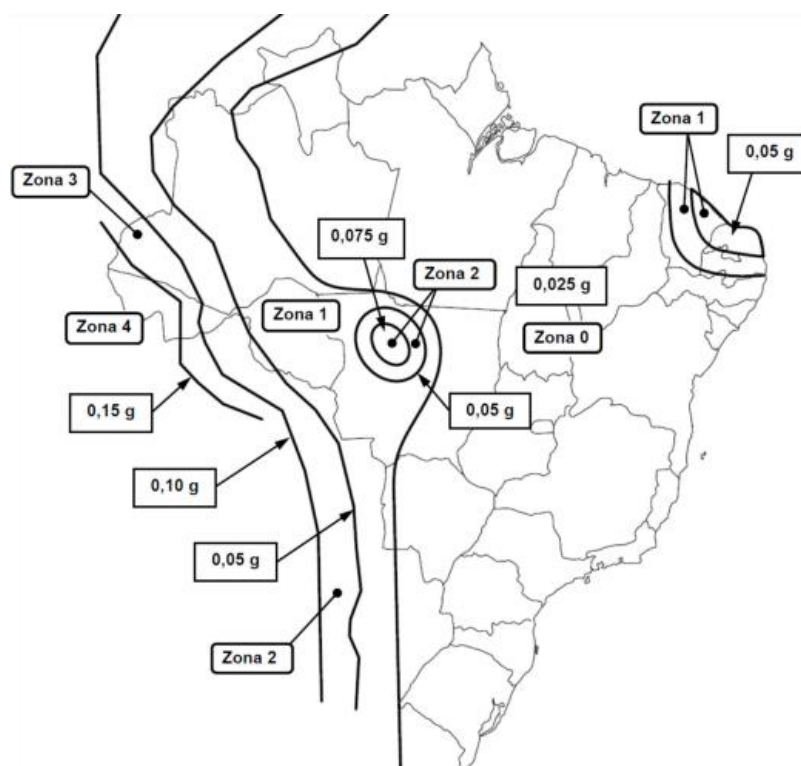
De acordo com a NBR 15421:2023, todas as estruturas devem ser projetadas e construídas para resistir aos efeitos das ações sísmicas. A norma estabelece as cargas sísmicas que devem ser consideradas no projeto, levando em conta a capacidade de dissipação de energia das estruturas no regime inelástico e a sismicidade do território brasileiro.

Para os propósitos deste trabalho, serão apresentados de forma breve alguns aspectos essenciais que devem ser considerados durante a análise sísmica utilizando o método das forças horizontais equivalentes.

3.6.1 Zoneamento sísmico

Para a definição das cargas sísmicas a serem aplicadas nos projetos estruturais, a ABNT NBR 15421:2023 estabeleceu um zoneamento sísmico no território brasileiro, dividindo-o em cinco zonas (Figura 4) com base na variação da aceleração sísmica horizontal característica normalizada (a_g) para terrenos de Classe B (rocha), nas faixas estabelecidas na Tabela 3.

Figura 4 - Zonas sísmicas do Brasil.



Fonte: ABNT NBR 15421:2023.

Tabela 3 - Zonas sísmicas.

Zona sísmica	Valores de a_g
Zona 0	$a_g = 0,025g$
Zona 1	$0,025g \leq a_g \leq 0,05g$
Zona 2	$0,05g \leq a_g \leq 0,10g$
Zona 3	$0,10g \leq a_g \leq 0,15g$
Zona 4	$a_g = 0,15g$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15421:2023.

3.6.2 Classes dos terrenos

De acordo com a ABNT NBR 15421:2023, o impacto da ação sísmica em uma edificação é influenciado por diversos fatores, incluindo as características dos terrenos. A rigidez e o amortecimento das camadas superficiais do solo afetam as ondas sísmicas que se propagam a partir do interior da Terra. O terreno de fundação deve ser classificado em uma das classes definidas na Tabela 4, com base nos valores médios dos parâmetros geotécnicos avaliados nos 30 m superiores do solo.

Tabela 4 - Classe do terreno.

Classe do terreno	Designação da classe do terreno	Propriedades médias para os 30m superiores do terreno	
		$\bar{V}_s$	$\bar{N}$
A	Rocha sã	$\bar{V}_s \geq 1500 \text{ m/s}$	(não aplicável)
B	Rocha	$1500 \text{ m/s} \geq \bar{V}_s \geq 760 \text{ m/s}$	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	$760 \text{ m/s} \geq \bar{V}_s \geq 370 \text{ m/s}$	$\bar{N} \geq 50$
D	Solo rígido	$370 \text{ m/s} \geq \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$	$50 \geq \bar{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\bar{V}_s \leq 180 \text{ m/s}$	$\bar{N} \leq 15$
	-	Qualquer perfil, incluindo camada com mais de 3m de argila mole	
F	-	Solo exigindo avaliação específica, como: a. Solos vulneráveis à ação sísmica, como solos liquefazeis, argilas muito sensíveis e solos colapsíveis fracamente cimentados; b. Turfa ou argilas muito orgânicas; c. Argilas muito plásticas; d. Estratos muito espessos ($\geq 35 \text{ m}$) de argila mole ou média.	

Fonte: Adaptado da ABNT, 2023.

3.6.3 Espectro de resposta de projeto

Segundo a ABNT NBR 15421:2023, o espectro de resposta de projeto, $S_a(T)$, para acelerações horizontais, que representa a resposta elástica de um sistema de um grau de liberdade com 5% de amortecimento crítico, é definido a partir da aceleração sísmica horizontal característica, a_g , e da classificação do terreno. A norma estabelece as equações 1 e 2 para calcular as acelerações a_{gs0} e a_{gs1} , respectivamente:

$$a_{gs0} = C_a \cdot a_g \quad (1)$$

$$a_{gs1} = C_v \cdot 0,75 \cdot a_g \quad (2)$$

Onde:

- a_{gs0} : aceleração espectral para o período de 0,0s;
- a_{gs1} : aceleração espectral para o período de 1,0s;
- C_a : fator de amplificação sísmica no solo para o período de 0,0s;
- C_v : fator de amplificação sísmica no solo para o período de 1,0s;
- T : é o período natural associado a cada um dos modos de vibração da estrutura, expresso em segundos (s).

Conforme estabelecido na norma, o espectro de resposta de projeto é considerado aplicado à base da estrutura. Além disso, quando for identificado que uma estrutura, ou parte dela, possui uma fração de amortecimento crítico diferente de 5%, o projetista poderá aplicar um fator de correção ao espectro de resposta de projeto, desde que devidamente justificado, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de amplificação sísmica no solo.

Classe do terreno	C_a		C_v	
	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$
A	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,7	1,7
D	1,6	1,5	2,4	2,2
E	2,5	2,1	3,5	3,4

Fonte: ABNT NBR 15421:2023.

A norma também estabelece que o espectro de resposta de projeto, $S_a(T)$ é definido numericamente em 4 intervalos de períodos, em segundos, conforme as equações 3, 4, 5 e 6.

$$\text{Para } 0 \leq T \leq 0,04 \cdot \frac{C_v}{C_a} \quad S_a(T) = a_{gs0} \cdot (37,5 \cdot T \cdot \frac{C_a}{C_v} + 1,0) \quad (3)$$

$$\text{Para } 0,04 \cdot \frac{C_v}{C_a} \leq T \leq 0,3 \cdot \frac{C_v}{C_a} \quad S_a(T) = 2,5 \cdot a_{gs0} \quad (4)$$

$$\text{Para } 0,3 \cdot \frac{C_v}{C_a} \leq T \leq 2,0 \cdot \frac{C_v}{C_a} \quad S_a(T) = \frac{a_{gs1}}{T} \quad (5)$$

$$\text{Para } T \geq 2,0 \cdot \frac{C_v}{C_a} \quad S_a(T) = 2 \cdot \frac{C_v}{C_a} \cdot (\frac{a_{gs1}}{T^2}) \quad (6)$$

3.6.4 Categorias de utilização e fatores de importância de utilização

Para cada estrutura, deve-se definir uma categoria de uso e o respectivo fator de importância, conforme indicado na Tabela 6. De acordo com a ABNT NBR 15421:2023 “estruturas que garantam o acesso a edificações de categoria II ou III também devem ser classificadas da mesma forma. No caso de uma estrutura conter áreas com diferentes categorias de ocupação, a categoria mais elevada deve ser considerada no projeto”.

Tabela 6 - Categorias de utilização e fatores de importância de utilização.

Categoria de utilização	Natureza da ocupação	Fator (I)
I	Todas as estruturas não classificadas como de categoria II ou III	1,0
II	Estruturas de importância substancial para a preservação da vida humana, no caso de ruptura, incluindo, mas não se limitando ao seguinte: — estruturas em que haja reunião de mais de 300 pessoas em uma única área — estruturas para educação pré-escolar, com capacidade superior a 150 ocupantes — estruturas para escolas primárias ou secundárias, com mais de 250 ocupantes — estruturas para escolas superiores ou para educação de adultos, com mais de 500 ocupantes — instituições de saúde para mais de 50 pacientes, mas sem instalações para tratamento de emergência ou cirurgias — instituições penitenciárias — quaisquer outras estruturas com mais de 5 000 ocupantes — instalações de geração de energia, de tratamento de água potável, de tratamento de esgotos e outras instalações de utilidade pública não classificadas como de categoria III — instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas cujo extravasamento possa ser perigoso para a população, não classificadas como de categoria III	1,25
	Estruturas especificadas como essenciais, incluindo, mas não se limitando, ao	

III	seguinte: — instituições de saúde com instalações para tratamento de emergência ou cirurgias — prédios de bombeiros, de instituições de salvamento e policiais, e garagens para veículos de emergência — centros de coordenação, comunicação e operação de emergência, e outras instalações necessárias para a resposta em emergência — instalações de geração de energia e outras instalações necessárias para a manutenção em funcionamento das estruturas classificadas como de categoria III — torres de controle de aeroportos, centros de controle de tráfego aéreo e hangares de aviões de emergência — estações de tratamento de água necessárias para a manutenção de fornecimento de água para o combate ao fogo — estruturas com funções críticas para a Defesa Nacional — instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas consideradas altamente perigosas, conforme classificação de autoridade governamental designada para tal	1,50
------------	--	------

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15421:2023.

3.6.5 Categoria sísmica

De acordo com a ABNT NBR 15421:2023, a categoria sísmica de cada estrutura é definida com base em sua zona sísmica, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Categoria sísmica.

Zona sísmica	Categoria sísmica
Zonas 0 e 1	A
Zona 2	B
Zonas 3 e 4	C

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15421:2023.

Para as estruturas localizadas na zona sísmica 0, a ABNT NBR 15421:2023 não exige requisitos de resistência sísmica. No entanto, já as estruturas na zona sísmica 1 devem apresentar sistemas estruturais que resistam a forças sísmicas horizontais em duas direções ortogonais, incluindo resistência a esforços de torção. Essas estruturas devem resistir a forças horizontais aplicadas simultaneamente em todos os pisos e em duas direções ortogonais, com valores numéricos específicos, calculados conforme a equação 7.

$$F_x = 0,01 \cdot w_x \quad (7)$$

Onde:

- F_x : força sísmica de projeto correspondente ao piso x;
- w_x : é o peso efetivo da estrutura no piso x, incluindo o peso dos equipamentos fixos e reservatórios de água, além de 25% da carga variável de utilização em áreas de armazenamento e estacionamento.

As estruturas das categorias sísmicas B e C, podem ser analisadas pelo método das forças horizontais equivalentes, que será o foco deste trabalho, conforme a ABNT NBR 15421:2023.

3.6.6 Força horizontal total

A ABNT NBR 15421:2023 apresenta a Equação 8 para calcular a força horizontal total na base da estrutura em uma determinada direção.

$$H = C_s \cdot W \quad (8)$$

Sendo W é o peso efetivo da estrutura e C_s é o coeficiente de resposta sísmica sendo calculado pela Equação 9, conforme apresentado na norma.

$$C_s = \frac{2,5 \cdot (a_{gs0}/g)}{(R/I)} \quad (9)$$

Onde:

- a_{gs0} : aceleração espectral para o período de 0,0s definida do item 3.6.3 deste trabalho;
- g : aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);
- I : fator de importância de utilização (Tabela 6);
- R : coeficiente de modificação de resposta, obtido a partir da Tabela 8 da ABNT NBR 15421:2023, a seguir.

Tabela 8 - Coeficientes de projeto para os diversos sistemas básicos sismorresistentes.

Sistema básicos sismorresistente	Coeficiente de modificação da resposta (R)	Coeficiente de sobre-resistência (Ω_0)	Coeficiente de amplificação de deslocamentos (c_d)
Pilares-parede de concreto com detalhamento usual	4	2,5	4
Pórticos de concreto com detalhamento usual	3	3	2,5
Pórticos de aço momento-resistentes com detalhamento usual	3,5	3	3
Pórticos de aço contraventados em treliça, com detalhamento usual	3,25	2	3,25
Sistema dual, composto por pórticos com detalhamento usual e pilares-parede de concreto com detalhamento usual	4,5	2,5	4
Estruturas de alvenaria estrutural com detalhamento usual	1,5	2,5	1,25
Pórticos em estruturas mistas de aço e concreto com detalhamento usual	3	3	2,5
Estruturas do tipo pêndulo invertido e sistemas de pilares em balanço	2,5	2	2,5

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15421:2023.

O coeficiente de resposta sísmica, determinado pela Equação 10, deve ser inferior ao valor obtido pela Equação 9, de acordo com as diretrizes normativas.

$$C_s = \frac{(a_{gs1}/g)}{T \cdot (R/I)} \quad (10)$$

Onde:

- a_{gs1} : aceleração espectral para o período de 1,0s definida do item 3.6.3 deste trabalho;
- T : período natural da estrutura, definido no subtópico seguinte e conforme especificado pela norma.

Além disso, a norma estabelece que o valor mínimo para C_s é de 0,01.

3.6.7 Determinação do período

O período natural de uma estrutura (T) pode ser obtido por extração modal, considerando suas características mecânicas e de massa. De acordo com a ABNT NBR 15421:2023, quando esse método não for possível, pode-se usar a Equação 11 para calcular o período natural aproximado (T_a).

$$T_a = C_T \cdot h_n^x \quad (11)$$

Considerando que h_n é a altura da estrutura acima da base, expressa em metros (m) e os coeficientes C_T e x são definidos da seguinte forma:

- $C_T = 0,0724$ e $x = 0,8$ para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são resistidas por pórticos de aço momento-resistentes, sem vínculo a sistemas mais rígidos que limitem sua deformação sob ação sísmica;
- $C_T = 0,0466$ e $x = 0,9$ para estruturas onde as forças sísmicas horizontais são totalmente resistidas por pórticos de concreto, sem conexão a sistemas mais rígidos que limitem sua deformação sob ação sísmica;
- $C_T = 0,0731$ e $x = 0,75$ para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são parcialmente resistidas por pórticos de aço contraventados com treliças;
- $C_T = 0,0488$ e $x = 0,75$ para todas as outras estruturas.

Conforme a norma o período avaliado por extração modal, para cada direção, não deve ser maior que o produto do coeficiente de limitação do período (C_{up}), especificado na Tabela 9 de acordo com a zona sísmica, pelo período T_a .

Tabela 9 - Coeficientes de limitação do período.

Zona sísmica	Coeficiente de limitação do período (C_{up})
Zona 2	1,7
Zona 3	1,6
Zona 4	1,5

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15421:2023.

3.6.8 Distribuição vertical das forças sísmicas

A distribuição da força horizontal total na base H é distribuída verticalmente entre as elevações da estrutura, resultando em uma força F_x aplicada em cada piso x , que é calculada pela Equação 12, conforme a ABNT NBR 15421:2023.

$$F_x = C_{vx} \cdot H \quad (12)$$

Onde C_{vx} (coeficiente de distribuição vertical) é determinado pela Equação 13, conforme segue:

$$C_{vx} = \frac{W_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i^k} H \quad (13)$$

Considerando que:

- W_x e W_i são as parcelas do peso efetivo total que correspondem às elevações x ou i , respectivamente;
- h_x^k e h_i^k são as alturas entre a base e as elevações x ou i , respectivamente;
- K é o expoente de distribuição, associado ao período natural da estrutura T , com os seguintes valores, conforme NBR 15421: 2023:
 - para estruturas com período inferior a 0,5 s, $k = 1$;
 - para estruturas com períodos entre 0,5 s e 2,5 s, $k = (T + 1,5)/2$;
 - para estruturas com período superior a 2,5 s, $k = 2$.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão abordadas as etapas que compõem o estudo, começando pela revisão bibliográfica sobre sismos. Em seguida, será apresentada uma descrição da edificação hipotética utilizada como base. O processo adotado para otimizar a obtenção de informações será explicado, com foco no desenvolvimento de uma planilha no Excel®, utilizado para o método escolhido na análise das forças. Esse procedimento servirá de base para a discussão de pontos importantes, como o somatório da força horizontal resultante, o momento de tombamento e a força aplicada no último pavimento, a qual varia de acordo com o número de pavimentos da edificação.

Vale ressaltar que este trabalho não incluiu a análise sísmica pelo método espectral, nem a análise com históricos de acelerações ao longo do tempo (conforme seções 10 e 11 da ABNT NBR 15421:2023, respectivamente).

4.1 Análise bibliográfica

Para fundamentar o desenvolvimento deste trabalho, primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica, com o intuito de adquirir conhecimento aprofundado sobre sismos e sua relação com as estruturas. Esse levantamento, por sua vez, foi o ponto de partida da metodologia, constituindo-se como uma base teórica. Para tanto, foram consultados livros, artigos científicos, monografias, teses e normas técnicas, visando compreender os principais efeitos dos sismos nas edificações, tais como deslocamentos, tensões e possíveis falhas estruturais. Dessa forma, esse estudo permitiu consolidar as informações necessárias para a análise posterior das forças envolvidas e do comportamento das edificações sob a ação de abalos sísmicos, além de fornecer embasamento sólido para as próximas etapas da pesquisa.

Ademais, foi realizado um estudo comparando-se a ABNT NBR 15421:2006 com a ABNT NBR 15421:2023, que trata do projeto de estruturas resistentes a sismos, a fim de embasar a análise dos efeitos sísmicos. Conforme destacado por Nóbrega *et al.* (2022), as principais mudanças nas novas diretrizes incluem a correção do mapa de perigo sísmico e ajustes no formato do espectro de resposta de projeto.

Uma vez que o estudo envolve a obtenção e análise de dados por meio de exemplos a serem propostos, ele é classificado como quantitativo, com o intuito de atender os objetivos estabelecidos. Conforme Flick (2013), a pesquisa quantitativa pode ser definida também pelo

estudo de um fenômeno, com base em um conceito, envolvendo a identificação de um problema e a formulação de uma ou mais hipóteses.

4.2 Caracterização da edificação e aspectos do modelo simulado

4.2.1 Descrição da edificação

Para os casos hipotéticos a serem apresentados nos resultados, será idealizado um modelo de edificação composta somente por pavimento tipo, cujo número de repetições varia de 1 a 40, com pé direito de 3m. A classe do terreno é rocha (B) e sua zona sísmica varia de 0 a 4. Para análise das forças sísmicas, será adotado o método das forças horizontais equivalentes.

O modelo de pavimento será semelhante ao de Justino (2022), para o qual foram adotadas as dimensões totais de 18m x 10m, sendo dividido em 6 cômodos, com dimensões de 5,84m x 4,82m cada e foi considerado o mesmo peso para cada pavimento. Dessa forma, o peso total da estrutura é obtido pela multiplicação do peso de cada pavimento pelo número total de pavimentos, em conformidade com as recomendações da norma. As cargas do peso próprio da estrutura hipotética a ser considerada incluem os pilares, as vigas, as lajes, a alvenaria e o revestimento.

4.2.2 Pré-dimensionamento dos elementos estruturais

Para determinar o peso próprio da estrutura considerada no projeto, foi realizado um pré-dimensionamento preliminar dos elementos estruturais, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 6118:2023. Esse processo foi essencial para definir as cargas permanentes que a estrutura deverá suportar. Assim, o dimensionamento dos pilares deve atender ao requisito mínimo de área de seção transversal de 360 cm², conforme estabelecido pela norma, garantindo a resistência necessária para suportar as cargas atuantes. Para verificar a área desses pilares, foram utilizadas as equações 14 e 15, aplicadas de modo a garantir a conformidade com os critérios normativos estabelecidos, sendo adotado o f_{ck} do concreto de 40 Mpa.

$$A_{p,i} = \frac{P_i}{0,5 \cdot f_{ck}} \quad (14)$$

$$P_i = n \cdot q_{pvto} \cdot A_i. \quad (15)$$

Onde:

- $A_{p,i}$: Área do pilar i;
- P_i : Carga estimada do pilar i;
- n : número de pavimentos com valor máximo de 40 pavimentos fixado ;
- q_{pvto} : Estimativa da carga que atua no pavimento, adotando valores de $12 \text{ kN/m}^2 = 1223,66 \text{ kgf/m}^2$;
- A_i : Área de influência do pilar i.

Com base nos dados apresentados, a área dos pilares foi calculada utilizando o software Excel®, cujos resultados estão organizados na Figura 5.

Figura 5 - Dimensionamento pilares.

PRÉ-DIMENSIONAMENTO PILARES										
Pilares	Ainf (m²)	fck (kgf/m²)	nº pav.	qtot (kgf/m²)	Pi (kgf)	Área (cm²)	Larg (cm)	Comp(cm)	Comp ado. (cm)	Área (cm²)
P1	8,18	4078864	40	1223,66	400381,55	1963,20	35	56	60	2100
P2	15,67	4078864	40	1223,66	766990,09	3760,80	35	107	110	3850
P3	15,67	4078864	40	1223,66	766990,09	3760,80	35	107	110	3850
P4	8,18	4078864	40	1223,66	400381,55	1963,20	35	56	60	2100
P5	15,09	4078864	40	1223,66	738601,18	3621,60	35	103	110	3850
P6	27,89	4078864	40	1223,66	1365115,10	6693,60	35	191	190	6650
P7	27,08	4078864	40	1223,66	1325468,51	6499,20	35	185	190	6650
P8	14,5	4078864	40	1223,66	709722,80	3480,00	35	99	110	3850
P9	8,14	4078864	40	1223,66	398423,70	1953,60	35	55	60	2100
P10	15,04	4078864	40	1223,66	736153,86	3609,60	35	103	110	3850
P11	15,67	4078864	40	1223,66	766990,09	3760,80	35	107	110	3850
P12	8,18	4078864	40	1223,66	400381,55	1963,20	35	56	60	2100

Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

No que se refere ao dimensionamento das vigas, a norma estabelece que a largura mínima permitida seja de 12 cm. Portanto, neste exemplo hipotético, opta-se por utilizar vigas com essa largura mínima. Além disso, no que diz respeito à altura, esta foi calculada considerando 10% do comprimento do vão (l), como o maior deles é de 5,84 m, tem-se que:

$$H = 10\% \cdot l = 10\% \cdot 5,84 = 0,584m$$

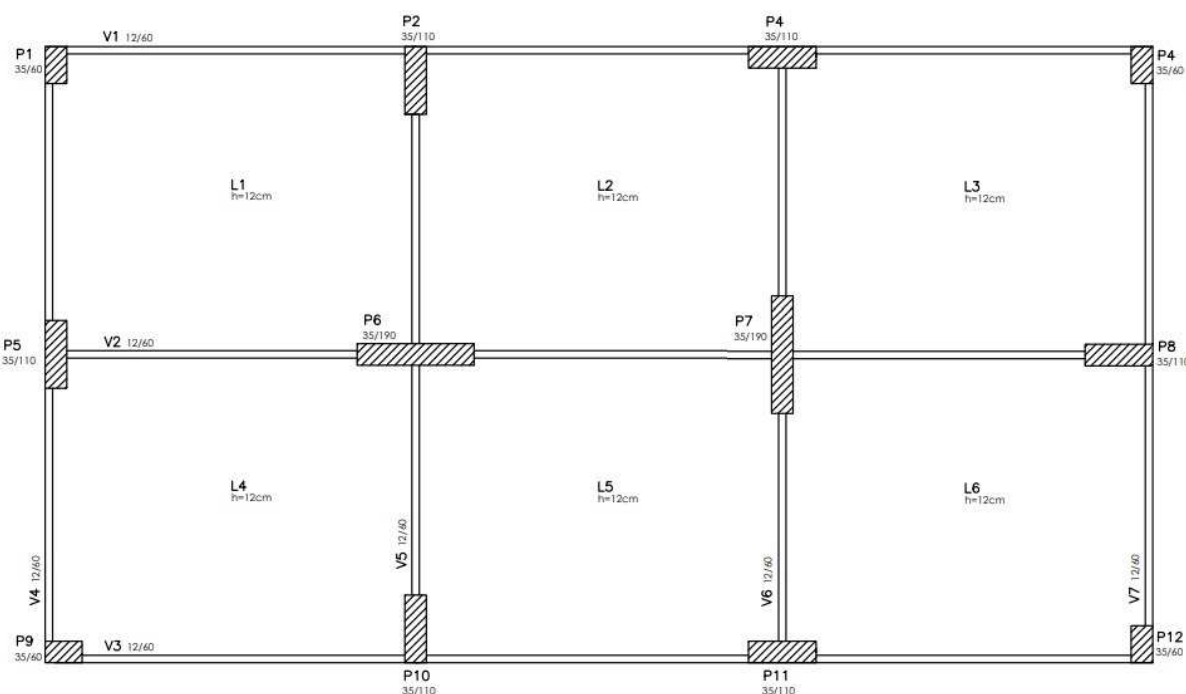
Com base nesse valor, adotou-se 60 cm de altura para todas as vigas, visando assegurar que elas suportem os esforços de flexão, cisalhamento e outras solicitações sem comprometer a integridade da estrutura.

Para o dimensionamento da laje, conforme a ABNT NBR 6118:2023, é estipulado um valor mínimo de espessura de 8 cm para lajes de piso que não estejam em balanço. No caso da

edificação hipotética analisada neste estudo, optou-se por adotar uma espessura de 12 cm para a laje, valor superior ao mínimo exigido pela norma, visando proporcionar maior resistência estrutural.

Após o processo de pré-dimensionamento, foi elaborada a planta de fôrma do pavimento tipo, que apresenta as dimensões e a disposição dos elementos estruturais, como vigas, pilares e lajes, em sua representação em planta baixa. Essa planta fornece uma visão clara da organização espacial dos componentes estruturais no pavimento tipo da edificação, conforme pode ser visualizada na Figura 6.

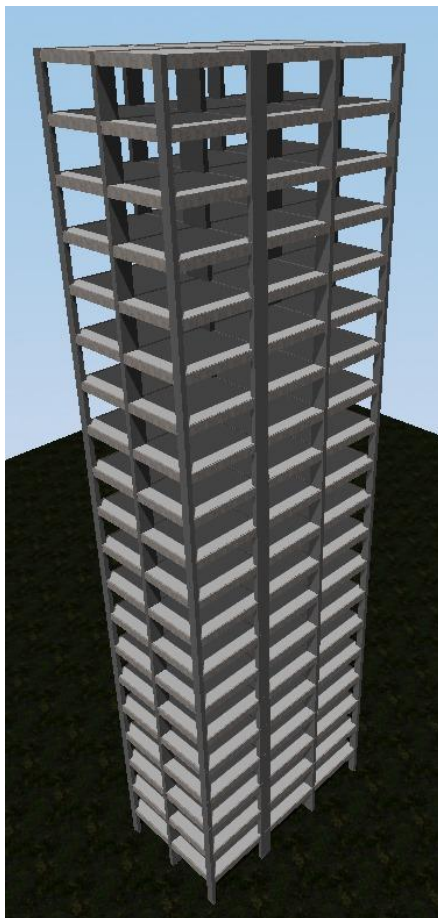
Figura 6 - Planta de fôrma.



Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

Para a representação esquemática da estrutura da edificação, foi utilizado o software TQS 2025, especializado em projetos estruturais. Esse programa permitiu a criação de um modelo tridimensional detalhado, facilitando a visualização precisa de cada elemento estrutural do edifício. Com isso, o modelo desenvolvido ilustra uma edificação com 20 pavimentos, permitindo analisar a disposição e interação entre os componentes estruturais, como vigas, pilares e lajes, conforme observa-se na Figura 7.

Figura 7 - Modelagem 3D da edificação hipotética.



Fonte: TQS, 2025.

Para o cálculo do peso próprio de cada pavimento, inicialmente, realizou-se a multiplicação do peso específico de cada material pelo volume correspondente de cada elemento estrutural (lajes, vigas e pilares). Em seguida, o somatório desses valores foi realizado, resultando no peso próprio total de cada pavimento. Para facilitar a interpretação dos resultados, os dados estão organizados na Tabela 10, que apresenta, além do peso próprio, o quantitativo de elementos estruturais, o volume de cada componente e o peso específico dos materiais utilizados, como concreto, argamassa e material cerâmico.

Tabela 10 - Peso próprio por pavimento.

Componentes da edificação	Dimensões	Quant.	Volume (m³)	Peso específico (kgf/m³)	Peso próprio por pavimento (kgf/pav.)
Pilares	3,00 x 0,35 x 0,60	4	2,52	2500	6300
	3,00 x 0,35 x 1,10	6	6,93	2500	17325
	3,00 x 0,35 x 1,90	2	3,99	2500	9975
Vigas	0,60 x 0,12 x 18,0	3	3,88	2500	9720
	0,60 x 0,12 x 10,0	4	2,88	2500	7200
Laje	0,12 x 4,82 x 5,84	6	25,247	2500	63117,5
Alvenaria	3,00 x 0,09 x 18,0	3	14,58	1300	18954
	3,00 x 0,09 x 10,0	4	10,80	1300	14040
Revestimento	3,00 x 0,03 x 18,0	6	9,72	2200	21384
	3,00 x 0,03 x 10,0	8	7,2	2200	15840
Peso total em cada pavimento					183855,5

Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

4.3 Análise do método das forças horizontais equivalentes

Para esta análise, foi desenvolvido um código computacional utilizando o software Excel®, que integra todas as informações necessárias para se obter os resultados de forma numérica. O código foi elaborado com o objetivo de quantificar a relação entre as cargas atuantes na edificação, as zonas sísmicas e terreno da classe B (rocha). Essa abordagem possibilita entender como essas interações influenciam o comportamento estrutural do edifício tipo, proporcionando uma análise dos fatores que afetam a estrutura.

Por meio do código computacional desenvolvido, será realizada a análise envolvendo a variação no número de pavimentos, com um limite máximo de 40 pavimentos. Assim, o objetivo é avaliar como o carregamento estrutural varia de acordo com a altura da edificação, levando em consideração as zonas sísmicas propostos pela ABNT NBR 15421:2023,

classificados conforme a Tabela 3 – Zonas sísmicas, descrita na Seção 3.6.1 sobre zoneamento sísmico.

A planilha permite que o usuário altere apenas três parâmetros: a quantidade de pavimentos, a classe do terreno e a zona sísmica. A modificação da quantidade de pavimentos será feita ajustando o valor numérico (1 a 40), enquanto a seleção da classe do terreno e da zona sísmica será realizada por meio de botões disponíveis na planilha, conforme destacado na Figura 8. Dessa forma, o código permite explorar diferentes cenários e avaliar como essas variáveis influenciam no comportamento estrutural do edifício.

Figura 8 - Visualização da interface para análise da força horizontal total.

Dados de entrada	
0 1 2 3 4	ZONAS SÍSMICAS
A B C D E	CLASSE DO TERRENO
g [m/s ²]	9,81
hsx [m] Distância entre duas elevações correspondentes ao pavimento	3
núm. de pavimentos (depende do projeto) [un]	40
Zona Sísmica (conforme Tabela 1 da NBR 15421: 2023)	4
ag (conforme Tabela 1 da NBR 15421: 2023), usando os valores limite de cada intervalo das Zonas 0 a 4. [m/s ²]	1,4715
Designação da classe do terreno (conforme Tabela 2 da NBR 15421: 2023)	Rocha
Classe do Terreno (conforme Tabela 2 da NBR 15421: 2023)	B
Ca (Ver tabela 3 da NBR 15421: 2023) [adm]	1
Cv (Ver tabela 3 da NBR 15421: 2023) [adm]	1
[Cv / Ca] * 0,04 (página 10 da NBR 15421: 2023)	0,04
[Cv / Ca] * 0,3 (página 10 da NBR 15421: 2023)	0,3
[Cv / Ca] * 2 (página 11 da NBR 15421: 2023)	2
Sa (T) Espectro de resposta (Ver pág. 10 da NBR 15421:2023) [m/s ²]	
Categoria de utilização (Ver tabela 4 da norma NBR 15421:2023) INSERIR	II
I [Fator de Importância de utilização] (Ver tabela 4 da norma NBR 15421:2023)	1,25
Categoria Sísmica (conforme Tabela 5 da NBR 15421: 2023)	C
R [Coeficiente de Modificação da Resposta] (Ver tabela 6 da norma NBR 15421:2023)	3
Ω ₀ [Coeficiente de sobrerresistência] (Ver tabela 6 da norma NBR 15421:2023)	3
Cd [Coeficiente de amplificação de deslocamento] (Ver tabela 6 da NBR 15421:2023) [adm]	2,5
Δx [Deslocamentos Limites Relativos entre Pavimentos] De acordo com a categoria de utilização (Ver Tabela 9) [m]	0,045
Δx [Deslocamentos Limites Relativos entre Pavimentos] [cm]	4,5
ags0 = Ca * ag [aceleração espectrais para o período de 0,0 s] (ver página 10) [m/s ²]	1,4715
ags1 = Cv * 0,75 * ag [aceleração espectrais para o período de 1,0 s] (ver página 10) [m/s ²]	1,103625
Cs Inicial = 2,5 * (ags0/g) / (R/I) [coeficiente de resposta sísmica] (ver página 20) [adm]	0,15625
Cs limite inferior [coeficiente de resposta sísmica] (ver página 20) [adm]	0,01
Cr [coeficiente de período da estrutura] (Ver página 21 da NBR 15421:2023) [adm] valor adotado para pórticos de concreto	0,0466
x (Ver página 21 da NBR 15421:2023) valor adotado para pórticos de concreto	0,9
hn = hsx * (no pavto.) [altura da estrutura a partir da base] (ver página 21) [m]	120
T=Ta=Cr*hn^x (ver página 20) [período natural aproximado da estrutura] [s]	3,464568
Cs limite superior (ags1/g) / (T*(R/I)) [coeficiente de resposta sísmica] [adm]	0,013529827
Cs final (ver página 20) [coeficiente de resposta sísmica] [adm]	0,013529827
Cs adotado [coeficiente de resposta sísmica] (ver página 20) [adm]	0,013529827
W, peso por pavimento [kgf/pav.] Valor adotado	183855,50
W, vide detalhe (consultar NBR 6118 e NBR) [kgf]	7354220,00
W, vide detalhe (consultar NBR 6118 e NBR) [tf]	7354,22
H = Cs*w [força horizontal total sísmica] (Ver página 20) [kgf]	99501,32411
H [força horizontal total sísmica] (Ver página 20) [tf]	99,50

Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

Ademais, na Figura 8 foi exemplificado o cálculo para um edifício com o número máximo de pavimentos, resultando em um peso total de 7.354.220 kgf ou 7.354,22 tf. Esse valor, por sua vez, é fundamental para determinar a força horizontal total, pois integra diversos parâmetros estruturais.

Esta seção da planilha desenvolvida calcula o valor final da força horizontal total, conforme descrito no subtópico 3.6.6, utilizando especificamente a Equação 8. Para isso, o cálculo leva em consideração o peso total da estrutura (W), que é obtido pela multiplicação do número total de pavimentos pelo peso próprio de cada pavimento. Esse valor, definido previamente no subtópico anterior como 183.855,5 kgf/pavimento, serve como base para os próximos passos.

Ainda com base na Equação 8, é necessário determinar o valor correspondente ao coeficiente de resposta sísmica (C_s). Para isso, esse coeficiente pode ser obtido através das Equações 9 ou 10. No entanto, caso os valores calculados por essas equações sejam inferiores ao mínimo estipulado de 0,01, deve-se atribuir o valor mínimo de 0,01. Por outro lado, se os resultados das equações forem superiores a esse limite, deve-se considerar o menor valor obtido entre os resultados das duas equações. Dessa forma, essa abordagem garante que o coeficiente de resposta sísmica esteja dentro dos parâmetros adequados para a análise estrutural.

Para o cálculo do coeficiente de resposta sísmica (C_s), é necessário determinar ou informar alguns parâmetros essenciais para os equacionamentos. Entre esses parâmetros, destacam-se a aceleração espectral para o período de 0,0s (a_{gs0}), conforme indicado na Equação 1; a aceleração da gravidade (g), que é definida como 9,81 m/s²; e o fator de importância de utilização (I), que foi estabelecido como 1,25 e obtido a partir da Tabela 6.

Além disso, é necessário considerar o coeficiente de modificação de resposta (R) para pórticos de concreto com detalhamento usual, cujo valor é 3, conforme apresentado na Tabela 8. Outros parâmetros relevantes incluem a aceleração espectral para o período de 1,0s (a_{gs1}), definida na Equação 2, e o período natural da estrutura (T), que é obtido pela Equação 11, levando em conta a altura da edificação e os valores estipulados pela norma para CT e x, sendo esses valores 0,0466 e 0,9, respectivamente, conforme mencionado no tópico 3.6.7. Por fim, a Figura 8 ilustra o valor final adotado para os cálculos, correspondendo ao " C_s adotado", que integra todas essas variáveis e parâmetros na análise sísmica da edificação.

No que diz respeito ao valor da força aplicada a cada elevação da edificação, a planilha foi projetada de forma automatizada para calcular e exibir esse valor com base na zona sísmica selecionada. Para as zonas sísmicas 0 e 1, a planilha utiliza a Equação 7, conforme detalhado

no subtópico 3.6.5. Por outro lado, para as zonas sísmicas 2, 3 e 4, a planilha aplica a Equação 12, conforme descrito no subtópico 3.6.8.

4.4 Força horizontal resultante na base

Como resultado da implementação da planilha, é possível realizar diversas análises, dentre as quais se destaca a determinação da força resultante na base do edifício, que está diretamente relacionada ao valor obtido por meio da Equação 8 e pode também ser calculada através do somatório das forças aplicadas em cada elevação da estrutura. Nesse sentido, a força aplicada em cada pavimento é determinada pela distribuição da força total, que é dividida em parcelas correspondentes a cada pavimento, sendo o cálculo dessa força total realizado por meio da Equação 12.

Ademais, apresenta-se a equação 16, a qual descreve o somatório das forças, variando desde o primeiro até o n -ésimo pavimento:

$$F_{HR} = \sum_{i=1}^n F_i. \quad (16)$$

Para a análise proposta, será avaliado o comportamento do edifício hipotético com um número variável de pavimentos, que pode variar entre 1 e 40, considerando especificamente as seguintes quantidades: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 38 e 40 pavimentos. Além disso, a análise levará em conta as cinco zonas sísmicas, conforme descrito na ABNT NBR 15421:2023, que estão detalhadas neste trabalho na Tabela 3, presente no subtópico 3.6.1.

4.5 Momento de tombamento

Com base nos dados que serão obtidos por meio do método das forças horizontais equivalentes e da planilha desenvolvida, será possível realizar cálculos fundamentais, como o do momento de tombamento da edificação. Para isso, foi definida uma altura fixa para cada pavimento, estabelecida em 3 metros, o que proporciona consistência nas análises realizadas. Além da altura, é crucial obter a força aplicada no piso de cada pavimento, pois essa força será utilizada para determinar o momento de tombamento, que representa a tendência da estrutura a se inclinar ou tombar quando submetida a forças horizontais.

Assim, quando a edificação possui múltiplos pavimentos, o momento de tombamento é calculado somando os momentos provocados em cada pavimento, considerando a força horizontal aplicada em relação à base, conforme apresentado na Equação 17.

$$M_{tomb} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot Y_i. \quad (17)$$

Sendo:

- M_{tomb} : momento de tombamento;
- F_i : força horizontal em cada pavimento;
- Y_i : braço de alavanca em relação a base.

A análise a ser desenvolvida nesta etapa terá como parâmetros principais a variação da quantidade de pavimentos, contemplando os seguintes valores: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 38 e 40 pavimentos. Além disso, será considerada a classe do terreno rocha, de acordo com a ABNT NBR 15421:2023. Também será analisada as diferentes zonas sísmicas, conforme descritas na norma. Esses parâmetros serão utilizados para obter valores específicos e verificar o comportamento estrutural da edificação com base na interação entre a quantidade de pavimentos, condição do terreno e a influência das zonas sísmicas.

Para realizar essa avaliação, a planilha integrará o cálculo automatizado das forças horizontais e momentos, gerando gráficos que facilitará a interpretação dos resultados e permitirá uma análise detalhada do comportamento estrutural da edificação em diferentes cenários.

4.6 Força máxima no último pavimento

Para a análise proposta, também será utilizado um código computacional implementado no software Excel®, que será a principal ferramenta de apoio para os cálculos e modelagem dos dados. A análise será diretamente correlacionada com a força aplicada no último pavimento. Isso significa que, independentemente do número de pavimentos, será considerado o valor correspondente ao pavimento superior. Por exemplo, em uma edificação com 20 pavimentos, a força analisada será a do 20º pavimento. Da mesma forma, para edificações com um número maior ou menor de pavimentos, o cálculo será ajustado de acordo com a elevação final da estrutura.

Como parte da análise gráfica, foi adotada uma abordagem para verificar a variação do comportamento das forças atuantes no último pavimento da edificação, considerando diferentes

alturas estruturais. Para isso, foram selecionados edifícios com as seguintes quantidades de pavimentos: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 38 e 40 pavimentos. A escolha dessas alturas permite uma avaliação abrangente, possibilitando a identificação de tendências no comportamento das forças com o aumento do número de pavimentos. Conforme Justino (2022), a força pode ser expressa pela Equação 18:

$$F_{ult,pav} = F_n. \quad (18)$$

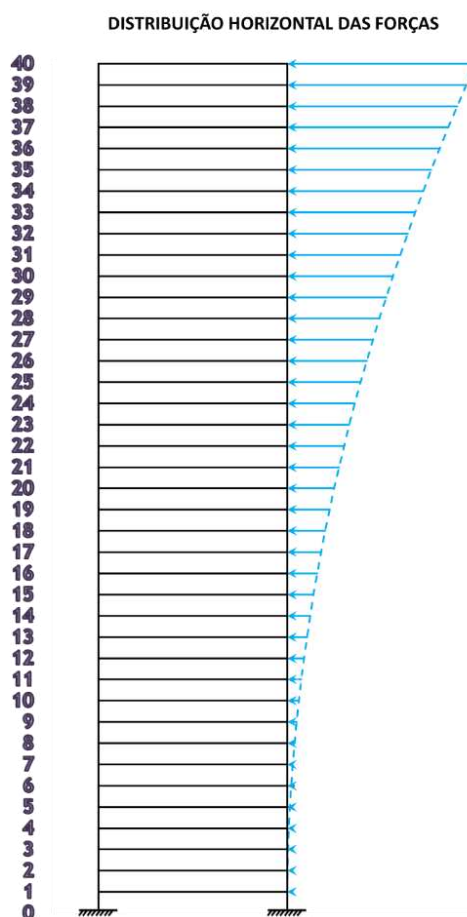
Além disso, foram analisadas as edificações em diferentes zonas sísmicas, a fim de investigar a influência destas no comportamento estrutural, conforme propõe a ABNT NBR 15421:2023. Também sendo considerada a classe B de terreno para essa análise, conforme descrito na norma.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos através da análise realizada com o auxílio de um código computacional desenvolvido no Software Excel®. Tendo como principal foco investigar o comportamento das forças e dos momentos na estrutura, considerando a variação no número de pavimentos e diferentes zonas sísmicas. A análise foi conduzida para terrenos da classe B (Rocha) e considerando o mapa da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil apresentado na ABNT NBR 15421:2023.

Os resultados incluem a distribuição das cargas equivalentes aplicadas em cada pavimento, ilustradas na Figura 9, a qual apresenta um caso genérico para melhor compreensão dos padrões de força ao longo da estrutura.

Figura 9 - Distribuição horizontal das forças.



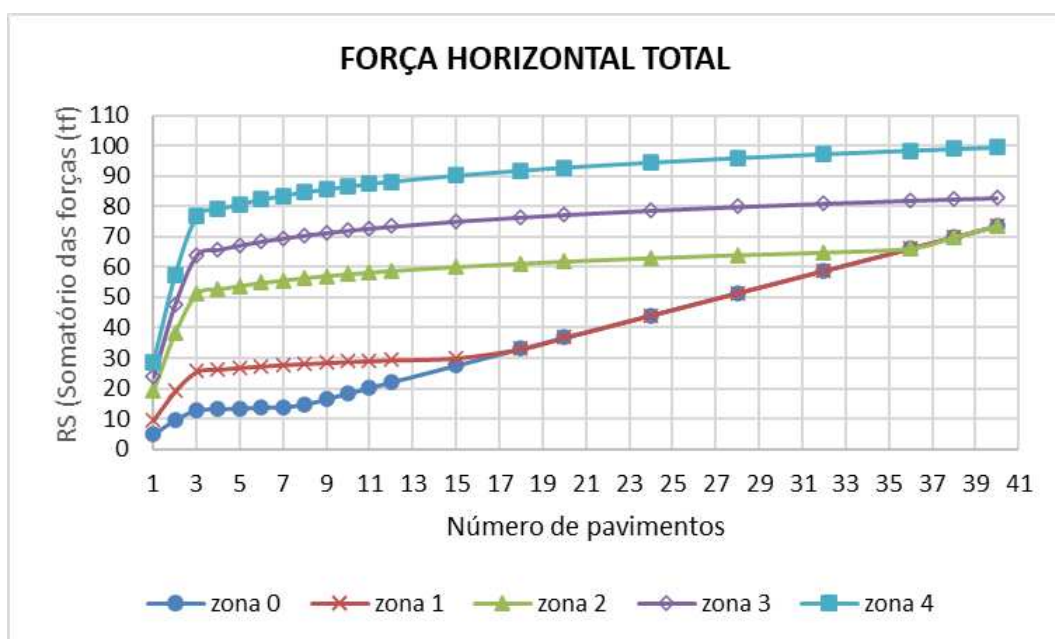
Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

Os resultados foram estruturados em três tópicos: análise da força horizontal total na base da edificação, somatório do momento de tombamento e força máxima aplicada no último pavimento.

5.1 Análise da força horizontal resultante

Após a determinação dos parâmetros, foi analisado o somatório das forças horizontais para cada um dos casos, levando em consideração as variações no número de pavimentos e na zona sísmica, com foco no terreno de classe B (Rocha). Os valores da força horizontal total estão representados no eixo vertical (ordenada), enquanto o número de pavimentos da edificação é mostrado no eixo horizontal (abscissa), conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Força horizontal total na edificação.



Fonte: Autora, 2024.

Observa-se na Figura 10 que as curvas apresentam tendência de crescimento do somatório das forças (R_s) à medida que o número de pavimentos aumenta. Nota-se que as zonas 2, 3 e 4 apresentam um comportamento semelhante, com a força aumentando mais intensamente com o número de pavimentos, até 3 pavimentos, e variando pouco entre 4 e 40 pavimentos. No entanto, as zonas 0 e 1 apresentam um comportamento distinto, começando com um trecho com inclinação contínua, seguido por um patamar, resultando em um crescimento constante que alcança cerca de 70 tf.

A análise dos valores nas diferentes zonas sísmicas demonstra que a zona 4 apresenta os maiores valores de R_s em todos os casos, enquanto a zona 0 registra os menores. Como exemplo, pode-se comparar uma edificação de 10 pavimentos, cuja força máxima na zona 0 é de 18,39 tf, enquanto chega a 86,62 tf na zona 4, uma diferença de cerca de 78%.

Na zona 0, para uma edificação de 1 pavimento, o valor de R_s é de 4,79 tf, enquanto para uma edificação de 40 pavimentos, esse valor atinge 73,54 tf, evidenciando uma diferença de 93%. Por sua vez, na zona 1, o valor de R_s para uma edificação de 1 pavimento é de 9,58 tf, e para uma edificação de 40 pavimentos o valor é de 73,54 tf, resultando em uma variação de 86,97%. Diferenças semelhantes ocorrem também para as outras zonas, apesar de as curvas apresentarem comportamento diferente.

À medida que o número de pavimentos aumenta, a força horizontal total também cresce, mas com uma taxa diferente dependendo da zona sísmica. Nas zonas de alta intensidade (zonas 3 e 4), o impacto sísmico é mais significativo, exigindo atenção especial no dimensionamento estrutural de edifícios com mais pavimentos.

A mudança no comportamento das curvas na Figura 10 ocorre em função da variação do valor de C_s , adotado nos cálculos, o qual depende da quantidade de pavimentos. Para a análise considerando o solo B e a zona sísmica 4, o valor de C_s utilizado nos cálculos para edifícios com até 2 pavimentos corresponde ao C_s inicial, determinado pela Equação 9, conforme descrito neste trabalho. Esse valor é mantido fixo, pois é inferior ao obtido pela Equação 10. No entanto, para edifícios com mais de 3 pavimentos, o valor de C_s passa a ser o calculado pela Equação 10, por ser menor que o inicial, porém superior ao valor mínimo de 0,01. Para este último caso, o aumento das forças ocorre em menor proporção devido à redução progressiva do valor de C_s à medida que o número de pavimentos aumenta. Além disso, considera-se o valor do período, conforme determinado na Equação 10.

Considerando a zona sísmica 4, a fim de garantir uma melhor compreensão, apresentam-se a seguir os cálculos de C_s para o solo B, referentes a edificações de 1 a 10 pavimentos, com o propósito de comprovar o que foi exposto no parágrafo anterior. Para o cálculo do coeficiente de resposta sísmico (C_s), conforme detalhado anteriormente, a ABNT NBR 15421:2023 estabelece duas equações específicas para diferentes condições de projeto, além de impor um limite mínimo, determinando que o valor de C_s não deve ser inferior a 0,01. A primeira equação, descrita como Equação 9, é utilizada para o cálculo inicial de C_s , considerando fatores como aceleração espectral para o período de 0,0s (ags_0), a aceleração da gravidade (g), o fator de importância de utilização (I) e o coeficiente de modificação de resposta (R). A segunda, a Equação 10, é aplicada para ajustar o valor calculado inicialmente, levando em conta

parâmetros adicionais, como o período natural da estrutura (T) . No caso de edifícios com 1 pavimento, serão aplicadas ambas as equações para garantir a determinação precisa do Cs adequado, conforme descrito no subtópico 3.6.6, respeitando-se, ainda, o valor mínimo estipulado pela norma.

Em relação à Equação 9, alguns dos parâmetros utilizados são tabelados e estão vinculados à classificação da edificação. O coeficiente de modificação de resposta (R) pode ser obtido por meio da Tabela 8, sendo adotado, para este caso específico, o valor 3, que corresponde a pórticos de concreto com detalhamento usual. Além desse parâmetro, define-se a categoria e o fator de importância (I), conforme a Tabela 6. Para este caso, foi adotada a categoria II e o fator de importância de 1,25, que se aplica a estruturas de grande relevância para a preservação da vida humana em caso de colapso, como aquelas que reúnem mais de 300 pessoas em uma única área, entre outras.

Com base na classificação do solo como rocha (B), a aceleração espectral para o período de 0,0 s (a_{gs0}) é determinada pela Equação 1, sendo que a aceleração sísmica (a_g) depende diretamente da zona sísmica em questão. Para este caso, foi definida a zona sísmica 4, e de acordo com a Tabela 3, o valor de a_g correspondente é:

$$\begin{aligned}a_g &= 0,15 \cdot g \\a_g &= 0,15 \cdot 9,81 \\a_g &= 1,472 \text{ m/s}^2\end{aligned}$$

Conforme a Tabela 5, para o solo B, o valor de C_a é 1. Assim, com base nesse valor, e aplicando na Equação 1, a aceleração espectral para o período de 0,0 s corresponde a:

$$\begin{aligned}a_{gs0} &= C_a \cdot a_g \\a_{gs0} &= 1 \cdot 1,472 \\a_{gs0} &= 1,472 \text{ m/s}^2\end{aligned}$$

Com os valores obtidos e considerando a aceleração da gravidade de $9,81 \text{ m/s}^2$, pode-se calcular o coeficiente de resposta sísmica pela Equação 9, obtendo-se:

$$C_s = \frac{2,5 \cdot \left(\frac{a_{gs0}}{g}\right)}{\left(\frac{R}{T}\right)}$$

$$C_s = \frac{2,5 \cdot \left(\frac{1,472}{9,81}\right)}{\left(\frac{3}{1,25}\right)}$$

$$C_s = 0,156$$

Dessa maneira, o valor calculado não deve ultrapassar o obtido pela Equação 9, sendo necessário, determinar o valor por meio de outra equação. Para isso, é preciso calcular o período natural da estrutura, utilizando os parâmetros CT e x, fornecidos pela ABNT NBR 15421:2023 e que variam conforme o tipo de sistema estrutural. No caso específico “para estruturas em que as forças sísmicas horizontais são totalmente resistidas por pórticos de concreto, não sendo estes ligados a sistemas mais rígidos que impeçam sua livre deformação, quando submetidos à ação sísmica”, adota-se CT= 0,0466 e x=0,9. O valor de hn, corresponde à altura da edificação, que, neste caso de 1 pavimento, é de 3 m. Com base nesses valores, utilizando a Equação 11, o período natural será calculado da seguinte forma:

$$T_a = C_T \cdot h_n^x$$

$$T_a = 0,0466 \cdot 3^{0,9}$$

$$T_a = 0,125$$

Em seguida, para determinar a aceleração espectral no período de 1,0 s (ags1), utiliza-se a Tabela 5, onde o valor de Cv para o solo B é 1, aplicando-se em seguida a Equação 2, obtendo-se:

$$a_{gs1} = C_v \cdot 0,75 \cdot a_g$$

$$a_{gs1} = 1,0 \cdot 0,75 \cdot 1,472$$

$$a_{gs1} = 1,104 \text{ m/s}^2$$

Por fim, com base nos resultados obtidos, o valor do coeficiente de resposta sísmica pela Equação 10 será:

$$C_s = \frac{\left(\frac{a_{gs1}}{g}\right)}{T \cdot \left(\frac{R}{T}\right)}$$

$$C_s = \frac{\left(\frac{1,104}{9,81}\right)}{0,125 \cdot \left(\frac{3}{1,25}\right)}$$

$$C_s = 0,374$$

Consequentemente, o valor encontrado é superior ao obtido anteriormente, e, por isso, para os demais cálculos, utiliza-se o valor de $C_s=0,156$, que ainda se mantém acima do limite mínimo de 0,01. Com o auxílio do Excel®, foram realizados cálculos para um edifício com variação de 1 a 10 pavimentos, a fim de determinar os valores do coeficiente de resposta sísmica e indicar qual deve ser adotado. Esses valores podem ser visualizados na Figura 11, apresentada a seguir.

Figura 11 - Valores de coeficiente de resposta sísmica.

Nº Pav.	R	I	g (m/s²)	CT	x	ag (m/s²)	Ca	Cv	ags0 (m/s²)	ags1 (m/s²)	hu (m)	T (s)	Cs (nE)	Cs (Eq. 9)	Cs (Eq. 10)	Cs (adotado)
1	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	3	0,125	0,01	0,156	0,374	0,156
2	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	6	0,234	0,01	0,156	0,201	0,156
3	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	9	0,337	0,01	0,156	0,139	0,139
4	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	12	0,436	0,01	0,156	0,107	0,107
5	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	15	0,533	0,01	0,156	0,088	0,088
6	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	18	0,628	0,01	0,156	0,075	0,075
7	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	21	0,722	0,01	0,156	0,065	0,065
8	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	24	0,814	0,01	0,156	0,058	0,058
9	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	27	0,905	0,01	0,156	0,052	0,052
10	3	1,25	9,81	0,047	0,9	1,472	1	1	1,472	1,104	30	0,995	0,01	0,156	0,047	0,047

Fonte: Autora, 2024.

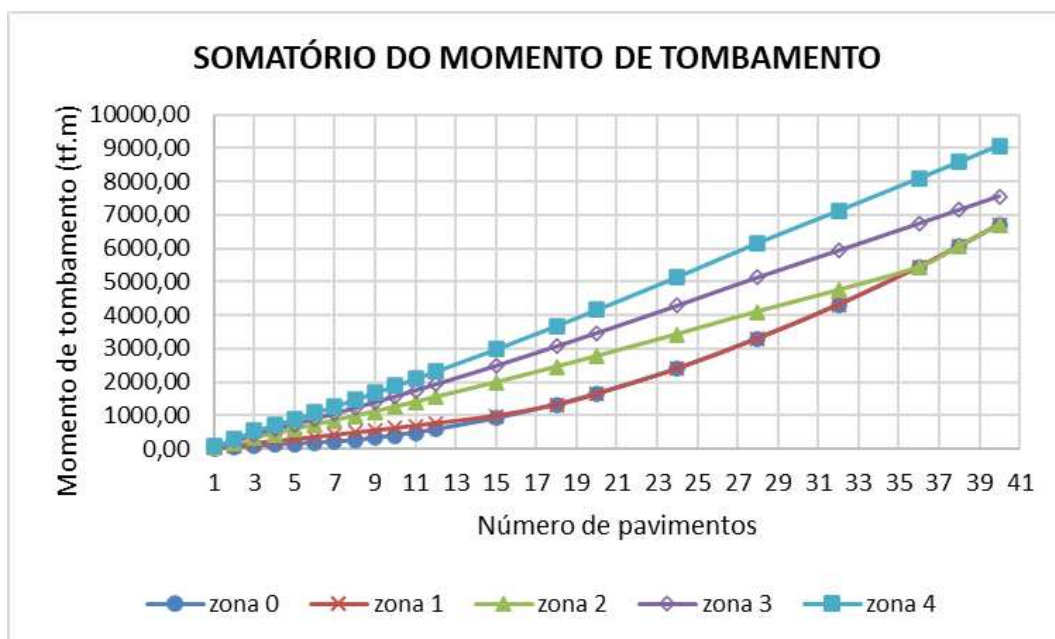
Como resultado os valores apresentados na Figura 11 estão em conformidade com a análise realizada anteriormente por meio da Figura 10, no qual a força a ser aplicada em cada pavimento está diretamente relacionada ao coeficiente C_s . Para edifícios com 1 ou 2 pavimentos, o valor de C_s se mantém constante, com a força aumentando de forma proporcional ao número de pavimentos. No entanto, para edifícios com mais de 3 pavimentos, o somatório das forças varia muito pouco, uma vez que, à medida que a altura da edificação aumenta, o período também aumenta, o que é inversamente proporcional ao coeficiente de resposta sísmica. Consequentemente, o valor calculado por meio da Equação 10 seja menor do que o obtido pela Equação 9. Portanto, o valor de C_s adotado para edifícios com mais de 3 pavimentos tende a diminuir conforme o número de pavimentos aumenta. Como o somatório das forças está diretamente relacionado tanto à quantidade de pavimentos quanto ao valor de C_s , mesmo que um desses valores apresente crescimento, o outro diminui. Com isso, resultando em um aumento insignificante das forças, independentemente da quantidade de pavimentos.

5.2 Análise do somatório do momento de tombamento

Com base no código desenvolvido no software Excel®, foi possível realizar a quantificação do momento de tombamento. Esse procedimento considerou as forças aplicadas em cada pavimento da edificação. Para efeito de padronização, foi adotada uma altura de 3 metros por pavimento, o que permitiu uma análise precisa da distribuição das forças horizontais ao longo da estrutura.

Após a realização das simulações para os diferentes cenários, os valores correspondentes foram obtidos e apresentados na Figura 12, que exibe uma curva representativa para cada zona sísmica analisada. No eixo vertical (ordenada), estão os valores do momento de tombamento, enquanto no eixo horizontal (abscissa) é indicado o número de pavimentos da edificação.

Figura 12 - Somatório do momento de tombamento.



Fonte: Autora, 2024.

Inicialmente, a Figura 12 demonstra que, à medida que o número de pavimentos da edificação aumenta, o somatório do momento de tombamento também cresce de forma significativa. Este comportamento é característico de estruturas altas, onde o aumento da altura e da massa da edificação intensifica as forças que tendem a provocar o tombamento.

Verifica-se também que o momento de tombamento é diretamente influenciado pela distribuição de peso e pela ação de forças externas. Conforme o número de pavimentos

aumenta, mais força é aplicada nas regiões superiores da edificação, criando um braço de alavanca maior, o que amplia o momento de tombamento. Em outras palavras, à medida que a edificação cresce em altura, a base precisa resistir a uma força cada vez maior para evitar o tombamento, comportamento esse que é semelhante para todas as zonas.

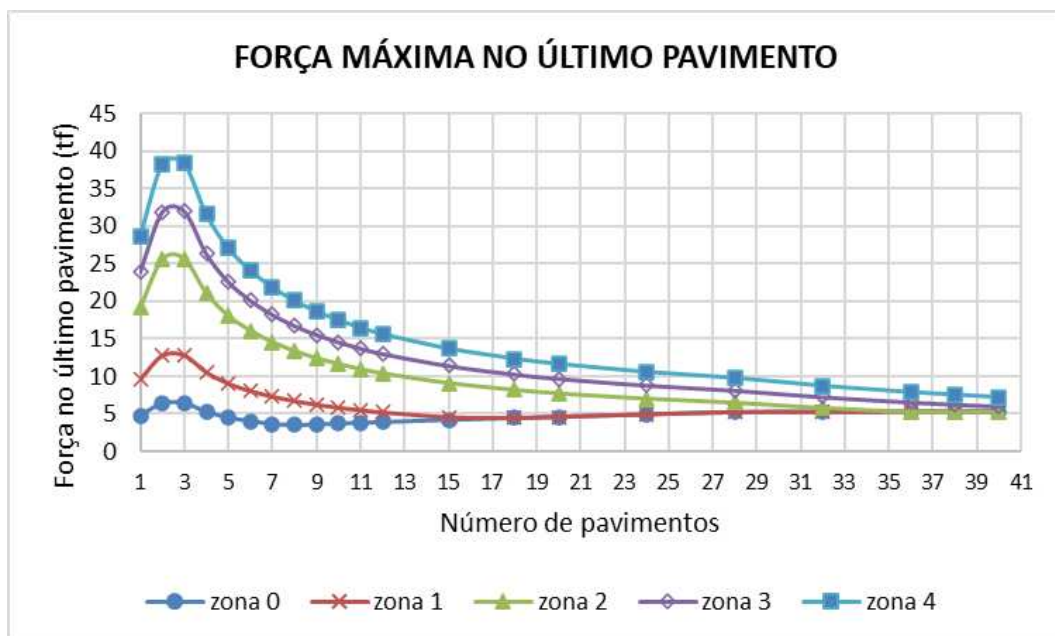
Outro ponto observado na Figura 12 é que edificações com um número reduzido de pavimentos, aproximadamente 12, as discrepâncias entre as zonas são menos acentuadas. No entanto, para edificações com um maior número de pavimentos (acima de 15 pavimentos), as curvas se distanciam consideravelmente, revelando que os efeitos das forças horizontais variam significativamente de acordo com a zona em questão.

Considerando o caso da edificação com 40 pavimentos, verifica-se que as zonas 0, 1 e 2 apresentam valores que convergem para, aproximadamente, 6.700 tf.m. No entanto, na zona 4, esse valor chega a aproximadamente 9.000 tf.m, o que representa um acréscimo de 2.300 tf.m, correspondendo a um valor 34% maior.

5.3 Análise da força máxima no último pavimento

A força aplicada no último pavimento foi determinada utilizando uma planilha automatizada desenvolvida no software Excel®. Para o cálculo deste valor, é necessário apenas observar os dados referentes ao último pavimento do cenário específico em análise. Dada a variedade de casos considerados, em que a quantidade de pavimentos varia, foi elaborada a Figura 13, que compila todos os valores obtidos. No eixo vertical (ordenada), estão os valores da força aplicada no último pavimento, enquanto no eixo horizontal (abscissa) está o número de pavimentos da edificação. Além da quantidade de pavimentos, também consideram-se diferentes zonas sísmicas, conforme estabelecido na ABNT NBR 15421:2023.

Figura 13 - Força máxima aplicada no último pavimento.



Fonte: Autora, 2024.

Observa-se que a força máxima atua com maior intensidade para número de pavimentos entre 2 e 3. Para edificações com um número maior de pavimentos, a força máxima tende a se estabilizar, alcançando um valor próximo do constante. Dessa forma, observa-se que para edificações com um número maior de pavimentos, a força aplicada se torna menos significativa em comparação com os pavimentos inferiores.

A partir da análise do Figura 13, observa-se que a zona 4 apresenta os maiores valores de força máxima, com um valor máximo de aproximadamente 38 tf nas edificações com menos pavimentos, diminuindo, até se estabilizar após o 20º pavimento. Em contraste, a zona 0 apresenta a menor força máxima, com valor máximo de aproximadamente 7 tf. As zonas 1, 2 e 3 mostram comportamentos intermediários, com valores de força máxima variando entre 13 e 32 tf. Apesar das variações, todas as zonas convergem para valores semelhantes à medida que o número de pavimentos aumenta, sugerindo que as diferenças de zona têm um impacto maior nas edificações com um número menor de pavimentos e se tornam menos significativas conforme o aumento no número de pavimentos.

Na zona 4, observa-se uma redução de cerca de 80% do valor máximo de força (para 3 pavimentos) em relação ao valor mínimo de força (para 40 pavimentos). Entretanto na zona 0, ocorre uma redução de 40% do valor máximo de força (para 3 pavimentos) em relação ao valor mínimo de força (para 7 pavimentos), após esse valor a curva tem comportamento crescente.

Para calcular a força aplicada ao último pavimento, é necessário, primeiramente, utilizar a Equação 12, conforme detalhado no subtópico 3.6.8. Para esse cálculo, é necessário utilizar também a Equação 13, que permite determinar o coeficiente de distribuição vertical (C_{vx}). Esse coeficiente, tem a função de distribuir a força total entre os pavimentos da edificação. Assim, o valor de C_{vx} inicia-se em zero e aumenta progressivamente, de modo que, ao final, o somatório de todos os coeficientes deve ser igual a 1. Com intuito de ilustrar esse conceito, a Figura 14 apresenta os valores de C_{vx} , destacando a força no último pavimento de uma edificação com 15 pavimentos, localizada na zona sísmica 0.

Figura 14 - Coeficiente de distribuição vertical e a força no último pavimento.

Nº Pavimento	C_{vx} [adm]	F_x [tf]
0	0	0
1	0,00	0,08
2	0,01	0,22
3	0,01	0,40
4	0,02	0,60
5	0,03	0,84
6	0,04	1,09
7	0,05	1,37
8	0,06	1,66
9	0,07	1,98
10	0,08	2,31
11	0,10	2,66
12	0,11	3,02
13	0,12	3,39
14	0,14	3,78
15	0,15	4,19
Σ	1	27,58

Fonte: Autora, 2024.

Conforme ilustrado na Figura 14, esse comportamento ocorre devido à variação do coeficiente de resposta sísmica. Inicialmente, para os edifícios na zona sísmica 4 com até 2 pavimentos, o valor de C_s se mantém fixo. No entanto, após essa quantidade de pavimentos, o valor de C_s começa a diminuir gradativamente, como mostrado na Figura 11, do subtópico 5.1. Isso explica o fato de que a força aplicada no último pavimento aumenta até um determinado número de pavimentos, e, a partir desse ponto, começa a diminuir conforme o número de pavimentos aumenta.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise sísmica de estruturas é essencial para garantir a segurança das edificações. Neste trabalho, aplicou-se o método das forças horizontais equivalentes, conforme a norma ABNT NBR 15421:2023, para avaliar a distribuição das forças sísmicas em função da variação do número de pavimentos. Foi desenvolvido um código computacional no Excel®, com base nas equações da norma, para analisar parâmetros como a força horizontal resultante (F_{HR}), o momento de tombamento (M_{tomb}) e a força máxima no último pavimento ($F_{ult,pav}$).

Portanto, a análise das F_{HR} evidenciou que o comportamento dessas forças varia conforme o número de pavimentos e a intensidade sísmica, como ilustrado pelas curvas da Figura 10. Verificou-se que a zona 4 apresentou os maiores valores de R_s em todos os casos, enquanto a zona 0 registrou os menores. Por fim, a variação no comportamento das curvas também foi influenciada pela alteração do coeficiente sísmico (C_s), que dependia diretamente da quantidade de pavimentos da edificação.

O M_{tomb} apresentou comportamento crescente com o aumento da quantidade de pavimentos, conforme se observou nas curvas da Figura 12. Em uma edificação de 40 pavimentos, o momento de tombamento na zona 4 foi 34% maior do que nas zonas 0, 1 e 2.

Verificou-se para a $F_{ult,pav}$ que a zona 4 apresentou os maiores valores, com cerca de 38 tf para edificações com até 3 pavimentos, enquanto a zona 0 registra os menores valores, em torno de 7 tf para até 3 pavimentos. Dessa forma, a força máxima é mais intensa em edificações com 2 a 3 pavimentos, estabilizando-se, posteriormente, em valores quase constantes à medida que o número de pavimentos aumenta. Como resultado, para edificações mais altas, a força máxima no último pavimento torna-se menos significativa em comparação com os pavimentos inferiores. Esse comportamento pode ser explicado pelo coeficiente de resposta sísmica, que influencia diretamente a variação da força conforme a altura da edificação.

Logo, os resultados obtidos ressaltaram a necessidade de um dimensionamento estrutural adequado, sobretudo em zonas de maior atividade sísmica, para assegurar a estabilidade e segurança das edificações.

6.1 Propostas para trabalhos futuros

Algumas sugestões para possíveis continuações deste trabalho são:

- Analisar outros sistemas sismo-resistentes previstos na ABNT NBR 15421:2023 ;

- Utilizar softwares de projetos para simular os esforços em edificações submetidas a forças horizontais equivalentes;
- Estudo mais detalhado de cada região sísmica do Brasil visando a elaboração de mapas de perigo sísmico, considerando as particularidades e características específicas de cada área;
- Investigar as ações sísmicas em modelos estruturais com variações de altura, forma, rigidez e massa, possibilitando a obtenção de conclusões sobre a influência dessas variáveis nas respostas das estruturas submetidas a esse tipo de solicitação;
- Realizar a simulação da mesma edificação utilizando diferentes métodos de análise previstos na norma, como a análise sísmica pelo método espectral e a análise sísmica com históricos de acelerações no tempo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 15421**. Projeto de estruturas resistentes a sismos. Rio de Janeiro. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2023.

CHRISTOPHERSON, Robert; BIRKELAND, Ginger H. **Geossistemas**. Porto Alegre: Grupo A, 2017.

DANTAS, R. O. O. **Subsídios para o projeto de estruturas sismo resistentes**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

DUARTE, João. C. Reativação tectónica, **Revista de Ciência Elementar**, v. 7, n. 2, 30 jun. 2019.

FLICK, Uwe. **Introdução à metodologia de pesquisa: um guia para iniciantes**. Porto Alegre: Editora Penso, 2013.

FRANÇA, D. H. R. **Análise sísmica de um edifício de concreto armado situado em diferentes zonas do Brasil**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2021.

JUSTINO, Lucas de Queiroz. **Estruturas submetidas a sismos: influência do solo e quantidade de pavimentos no método das forças horizontais equivalentes**. 2022. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2022.

LIMA NETO, Severino Batista de. **Estudo do efeito sísmico em projetos estruturais de regiões de instabilidade geológica**. 2017. 83 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2017.

MATA, Franklim Flamariom de Araújo. **A terra tremeu, o povo chorou: uma história dos terremotos de 1986-1987 no município de João Câmara, Rio Grande do Norte**. 2018. 172f. Dissertação (Mestrado em História) - Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

NASCIMENTO, Fernanda Alanna Alves do. **Estruturas submetidas a sismos: análise pelo método das forças horizontais equivalentes**. 2014. 77 f. Tese (Doutorado) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2014.

NÓBREGA, Petrus Gorgonio Bulhoes; NÓBREGA, Selma Hissae Shimura. **Perigo sísmico no brasil e a responsabilidade da engenharia de estruturas**. HOLOS, [S.l.], v. 4, p. 162-175, set. 2016. ISSN 1807-1600.

NÓBREGA, P. G. B.; SANTOS, S. H. C.; NÓBREGA, S. H. S.; PEREIRA, E. M. V. **Conceitos a esclarecer da norma NBR 15421 – Projeto de estruturas resistentes a sismos.** In: 63. Congresso Brasileiro do Concreto, 2022, Brasília.

POMEROL, Charles; LAGABRIELLE, Yves; RENARD, Maurice; GUILLOT, Stéphane. **Princípios de Geologia.** Porto Alegre: Grupo A, 2013. 1046 p.

POPP, José H. **Geologia Geral**, 7ª edição. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. 324 p.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil.** São Paulo: Editora Blucher, 2016.

SILVA, Emerson Mariano da; ALBUQUERQUE, Karina Karla Frota de; ALVES, Jose Maria Brabo; MELO, Francisco das Chagas Brandão. O Conhecimento sobre Sismos e Mudanças Climáticas como Proposta Pedagógica: estudo de caso em uma escola pública de Fortaleza/ce. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 529-537, set. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630016>.

SILVA, Marcus Vinícius Chagas da Silva; CRISPIM, Andrea Bezerra. **Geologia Geral.** Fortaleza : EdUECE, 2019. 140 p.

SOUZA, Ana Paula Trindade. **Determinação de Epicentros e Magnitudes de Sismos históricos no Brasil: Testes com uma Nova Equação de Atenuação de Intensidades.** Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SPOONER, Alecia M. **Geologia para Leigos.** Rio de Janeiro: Editora Alta Books, 2022. 408 p.

TQS INFORMÁTICA. Manual de início rápido. 2025. Disponível em: < <https://www.tqs.com.br/QSG/> >. Acesso em: 05 de set. de 2024.

VITORIO, Justino Feitoza. **Modelo matemático de triangulação geométrica na localização e ocorrência de terremotos ou sismos.** Caderno De Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE, v. 7, n. 3 p. 54-65, Out. 2022.

WICANDER, Reed; MONROE, James S. **Geologia - Tradução da 2ª edição norte-americana.** São Paulo: Cengage Learning, 2017. 464 p.