



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

DJALMA DA COSTA FONTES NETO

**COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS ENCONTRADAS PELO MÉTODO DAS
FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES E PELO MÉTODO DA ANÁLISE
MODAL ESPECTRAL PARA PROJETO RESISTENTE A SISMOS.**

PAU DOS FERROS - RN

2024

DJALMA DA COSTA FONTES NETO

**COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS ENCONTRA DAS PELO MÉTODO DAS
FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES E PELO MÉTODO DA ANÁLISE
MODAL ESPECTRAL PARA ESTRUTURA RESISTENTE A SISMOS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semiárido –
UFERSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos
Feros – 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.

F682c Fontes Neto, Djalma da Costa.
 COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS ENCONTRADAS PELO
 MÉTODO DAS FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES E DO
 MÉTODO DA ANÁLISE MODAL ESPECTRAL PARA PROJETO
 RESISTENTE A SISMOS. / Djalma da Costa Fontes
 Neto. - 2024.
 69 f. : il.

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

 1. análise estrutural. 2. resposta sísmica. 3.
 estruturas de concreto armado. 4. segurança
 estrutural. 5. TQS. 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.

DJALMA DA COSTA FONTES NETO

**COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS ENCONTRADAS PELO MÉTODO DAS
FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES E PELO MÉTODO DA ANÁLISE
MODAL ESPECTRAL PARA ESTRUTURA RESISTENTE A SISMOS.**

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

DATA DA APROVAÇÃO: 24/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra - UFERSA
Presidente

Prof. Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira - UFERSA
Examinador

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

Prof. Dr. Gilvan Bezerra dos Santos Júnior - UFERSA
Examinador

DEDICATÓRIA

A meu pai, Everton Carvalho de Fontes (In Memoriam)

A meu avô, Raimundo Jácome de Lima (In Memoriam)

A meu avô, Djalma da Costa Fontes (In Memoriam)

A minha mãe, Rosineide Maria Lima Fontes

A minha companheira, Sandrielly de Araújo

Bento

Aos meus irmãos, tios, primos e amigos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Rosineide Maria Lima Fontes, professora, fonte inesgotável de inspiração, que sempre acreditou nos esforços empregados na educação para transformar vidas e que, hoje, mais uma vez, consigo retribuir todo amor, carinho e cada gota de suor derramado para me trazer até aqui, conquistando esse sonho.

A meu pai, Everton Carvalho Fontes (*in memoriam*), mestre de obras, por toda dedicação e coragem para me proporcionar sempre o melhor. Pelo seu exemplo de força e de nunca desistir das batalhas e que me fez sonhar em um dia ser engenheiro civil, e construir casas assim como ele fazia. Essa conquista eu dedico de coração e alma a ti.

A minha companheira de vida, Sandrielly de Araújo Bento, por estar comigo em todos os momentos, incentivando, se preocupando e apoiando com todo amor, carinho e atenção.

A meus irmãos, Raimundo Jácome Lima Fontes e Diane Otília Lima Fontes, por sempre estarem presentes na minha vida.

Aos tios e tias, primos e primas que sempre estiveram comigo nessa aventura inexplicável que é a vida.

A meu professor orientador Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra, por ter se disposto a me orientar. Por todos os ensinamentos compartilhados, pela disponibilidade em esclarecer dúvidas e por todas as orientações fornecidas para a realização desse trabalho.

Ao meu professor, Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira, pela ajuda durante algumas etapas dessa pesquisa e por se dispor a participar da banca examinadora contribuindo com conhecimento a esse trabalho.

Ao meu professor, Dr. Matheus Fernandes de Araújo Silva, por se dispor a participar da banca examinadora acrescentando ao trabalho valioso conhecimento.

Ao meu professor, Gilvan Bezerra dos Santos Júnior, por se dispor a participar da banca examinadora e contribuir para a construção do trabalho.

Aos professores e professoras que contribuíram, desde o início dessa jornada, para minha formação com ensinamentos, conselhos e orientações. Vocês são a engrenagem maior da construção desse sonho. A vocês, todo o meu respeito e gratidão.

Em nome de Lucas Leite, a todos os meus amigos e amigas que estão ao meu lado me incentivando e acreditando no meu potencial.

ÉPIGRAFE

O Engenheiro

*“A luz, o sol, o ar livre
envolvem o sonho do engenheiro.
O engenheiro sonha coisas claras:
superfícies, tênis, um copo de água.*

*O lápis, o esquadro, o papel;
o desenho, o projeto, o número:
o engenheiro pensa o mundo justo,
mundo que nenhum véu encobre.*

*(Em certas tardes nós subíamos
ao edifício. A cidade diária,
como um jornal que todos liam,
ganhava um pulmão de cimento e vidro).*

*A água, o vento, a claridade,
de um lado o rio, no alto as nuvens,
situavam na natureza o edifício
crescendo de suas forças simples.”*

Poema de João Cabral de Melo Neto

RESUMO

A crescente preocupação com a segurança de edificações em áreas propensas a terremotos demanda uma análise rigorosa das respostas sísmicas em estruturas. Este trabalho investiga os efeitos dessas respostas comparando dois métodos de análise descritos na ABNT NBR 15421:2023: Forças Horizontais Equivalentes (FHE) e Análise Modal Espectral (AEM). O objetivo é comparar os efeitos dos sismos através das respostas obtidas em alguns elementos estruturais da edificação, utilizando como parâmetros os deslocamentos horizontais, verticais, os momentos fletores e os esforços normais obtidos. A metodologia envolveu a simulação de uma edificação hipotética utilizando o software TQS, onde foram aplicadas cargas sísmicas com os dois métodos. O foco da análise foi nos pilares e vigas, essenciais para a estabilidade estrutural. Os resultados mostraram que o método FHE indicou deslocamentos horizontais, deslocamentos verticais e esforços mais altos do que o AEM. O FHE oferece uma abordagem direta e simplificada para a análise estrutural de edificações, pois dispensa recursos computacionais mais complexos e permite estimar os efeitos sísmicos na estrutura com cálculos relativamente acessíveis. Em contraste, o AEM, por se tratar de uma análise mais complexa, resultou em esforços mais adequados, evidenciando sua eficácia na análise do comportamento dinâmico das edificações. As conclusões destacam a importância de utilizar métodos mais avançados, como a AEM, em projetos de construções em áreas de risco sísmico. O FHE se mostra como uma alternativa prática e de baixo custo, fornecendo uma estimativa confiável e rápida das forças atuantes, garantindo segurança das estruturas.

Palavras-chave: Análise estrutural, resposta sísmica, estruturas de concreto armado, segurança estrutural, TQS.

ABSTRACT

The increasing concern for building safety in earthquake-prone areas demands a rigorous analysis of seismic responses in structures. This study investigates the effects of these responses by comparing two analysis methods described in ABNT NBR 15421:2023: Equivalent Lateral Force (ELF) and Modal Response Spectrum Analysis (MRSA). The objective is to compare seismic effects by evaluating the responses of key structural elements in the building, using parameters such as horizontal and vertical displacements, bending moments, and axial forces. The methodology involved simulating a hypothetical building using TQS software, where seismic loads were applied through both methods. The analysis focused on columns and beams, essential for structural stability. Results indicated that the ELF method exhibited higher horizontal and vertical displacements, as well as increased forces compared to MRSA. ELF offers a direct and simplified approach to structural analysis by reducing the need for advanced computational resources, providing accessible seismic effect estimates through relatively straightforward calculations. In contrast, MRSA, being a more complex analysis, yielded more accurate force distributions, showcasing its effectiveness in assessing the dynamic behavior of buildings. Conclusions highlight the importance of employing advanced methods, such as MRSA, for structural design in seismic-risk zones. ELF proves to be a practical, cost-effective alternative, offering a quick and reliable estimate of acting forces and ensuring structural safety.

Keywords: Structural analysis, seismic response, reinforced concrete structures, structural safety, TQS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das camadas internas da Terra.	19
Figura 2: Representação das placas tectônicas no mundo.	20
Figura 3: Ondas primárias e secundárias.	21
Figura 4: Ondas de Rayleigh e Love.	22
Figura 5: Mapa do histórico de sismos no Brasil.	28
Figura 6: Mapa das Zonas Sísmicas.	30
Figura 7: Modos de vibração da estrutura.	40
Figura 8: Corte esquemático da edificação.	43
Figura 9: Planta esquemática dos pavimentos.	44
Figura 10: Área de influência dos pilares.	45
Figura 11: Planta de forma dos elementos estruturais do edifício.	47
Figura 12: Representação tridimensional da estrutura hipotética.	47
Figura 13: Habilitação de cargas para simulação de sismo no Software TQS.	50
Figura 14: Adicionando cargas pontuais que simulam as forças horizontais equivalentes no TQS.	51
Figura 15: Primeira etapa da análise sísmica do TQS.	53
Figura 16: Segunda etapa da análise sísmica do TQS.	54
Figura 17: Determinação da norma para análise sísmica do TQS.	54
Figura 18: Definição dos coeficientes para análise sísmica do TQS.	55
Figura 19: Etapa final para inserir os coeficientes da análise sísmica do TQS.	56
Figura 20: Processamento dos esforços para análise sísmica do TQS.	57
Figura 21: Cargas utilizadas para a comparação dos resultados.	58
Figura 22: Elementos para o estudo dos métodos HFE e AEM.	59
Figura 23: Esforços normais x deslocamentos em P1.	60
Figura 24: Gráficos dos esforços normais e dos deslocamentos obtidos na análise sísmica para as cargas sísmicas FHE no TQS.	61
Figura 25: Momentos Fletores x deslocamentos em V4.	63
Figura 26: Gráficos dos momentos fletores e dos deslocamentos obtidos na análise sísmica para as cargas sísmicas FHE no TQS.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização da Escala Richter.	24
Tabela 2: Caracterização da Escala Mercalli.	25
Tabela 3: Zonas sísmicas.	29
Tabela 4: Classe do terreno para projetos resistentes a sismos.	31
Tabela 5: Fatores de amplificação sísmica do solo.	32
Tabela 6: Definição das categorias de utilização e dos fatores de importância de utilização. .	33
Tabela 7: Categoria sísmica.	34
Tabela 8: Coeficientes de projeto para os diversos sistemas básicos sismorresistentes.	36
Tabela 9: Coeficientes de limitação do período.	38
Tabela 10: Dimensionamento dos pilares.	46
Tabela 11: Peso próprio por pavimento.	48
Tabela 12: Cálculo das forças horizontais	49

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
FHE	Método das forças horizontais equivalentes
AEM	Método da análise espectral modal
g	Aceleração da gravidade
m	Metro
s	Segundo
f	Força
kg	Quilograma
m/s	Metros por segundo
m/s ²	Metros por segundo ao quadrado
MPa	Mega Pascal
N	Newton
kN	Quilo Newton
kN/m ²	Quilo Newton por metro ao quadrado
kgf	Quilograma força

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GERAL	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO TEÓRICA	18
3.1. ESTRUTURA DAS CAMADAS INTERNAS DA TERRA	18
3.2. PLACAS TECTÔNICAS	19
3.3. SISMOS: MECANISMOS E CARACTERÍSTICAS	20
3.3.1. Aparelhos e métodos para quantificar o sismo	22
3.3.2. Escala Richter	23
3.3.3. Escala Mercalli	24
3.4. REGIÕES MAIS SUSCEPTÍVEIS AOS SISMOS	25
3.5. HISTÓRICO DOS SISMOS	26
3.5.1. No Mundo	26
3.5.2. No Brasil	27
3.6. NORMA BRASILEIRA PARA PROJETOS DE ESTRUTURAS RESISTENTES A SISMOS – ABNT NBR 15421:2023	28
3.6.1. Zonas sísmicas	29
3.6.2. Classe do solo	30
3.6.3. Espectro de resposta	31
3.6.4. Categorias de utilização e fatores de importância de utilização	32
3.6.5. Categoria sísmica	34
3.6.6. Análise sísmica pelo método das forças horizontais equivalentes	35
3.6.6.1. Força Horizontal Total	35
3.6.6.2. Determinação do período	37

3.6.6.3.	<i>Distribuição vertical das forças sísmicas</i>	38
3.6.7.	Análise sísmica pelo método espectral	39
3.6.7.1.	<i>Número de modos a ser considerado</i>	39
3.6.7.2.	<i>Respostas modais para o projeto</i>	39
4.	METODOLOGIA	41
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO HIPOTÉTICO SIMULADO.....	42
4.2.1.	Descrição da edificação	42
4.2.3.	Análise sísmica pelo método das forças horizontais equivalentes (FHE)	49
4.2.4.	Análise sísmica pelo método espectral (AEM)	52
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1.	ANÁLISE DOS VALORES ABSOLUTOS DE ESFORÇOS NORMAIS E RELAÇÃO COM OS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS PROVOCADOS NO PILAR. 60	
5.2.	ANÁLISE DOS VALORES ABSOLUTOS DE MOMENTOS FLETORES E RELAÇÃO COM OS DESLOCAMENTOS VERTICAIS PROVOCADOS NA VIGA.....	62
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento populacional no Brasil tem sido significativo, resultando na diminuição do espaço disponível e na proliferação de altos edifícios que dominam as paisagens urbanas. Estas construções, devido à sua magnitude, requerem atenção especial, pois são vulneráveis a fenômenos naturais. Assim, ao construir em regiões propensas a sismos e terremotos, é fundamental considerar esses potenciais desastres para garantir a segurança e a integridade das estruturas (Nascimento, 2014).

Os terremotos são fenômenos naturais resultantes da dinâmica ativa da Terra. Eles ocorrem devido à liberação repentina de energia acumulada, provocando vibrações e tremores decorrentes do deslocamento de rochas ao longo das falhas geológicas. Após um terremoto principal, há uma tendência de ocorrerem réplicas ou terremotos secundários, como resultado do ajuste contínuo das rochas ao longo da falha (Wicander; Monroe, 2017).

Os danos causados por esses eventos sísmicos podem ser imensos, especialmente quando ocorrem com alta magnitude e intensidade. A magnitude é uma escala que mede a amplitude das vibrações, enquanto a intensidade avalia os efeitos e danos provocados, que podem incluir perdas humanas e a destruição de estruturas (Defiltro, 2018). Dada a severidade potencial dos terremotos, é crucial que as sociedades estejam preparadas para mitigar as consequências desses desastres naturais.

Diante dos grandes desastres causados por terremotos e das significativas perdas resultantes, tornou-se essencial a criação de normas para mitigar os impactos desses fenômenos e aumentar a segurança. No Brasil, isso levou à oficialização da NBR 15421 – Norma Brasileira de Estruturas Resistentes a Sismos. A norma brasileira ABNT NBR 15421, que trata do projeto de estruturas resistentes a sismos, foi publicada pela primeira vez em 2006. No início, era considerada complexa e usada apenas em projetos específicos. Com o tempo, ela se tornou mais conhecida e passou a ser aplicada com mais frequência em estudos acadêmicos e projetos de engenharia atuais, refletindo uma maior preocupação com a segurança de construções frente a tremores, mesmo em regiões de baixa atividade sísmica como o Brasil (Nóbrega *et al.*, 2023).

De acordo com Nóbrega *et al.* (2022), dois fatores principais explicam a limitada disseminação e o menor conhecimento da norma NBR 15421. O primeiro fator é que a norma não considera sua aplicação a várias estruturas especiais, como obras hidráulicas, arcos, silos, tanques, chaminés, torres, estruturas offshore ou que utilizam técnicas construtivas não convencionais. O segundo fator é a isenção de seus requisitos para as construções situadas na

zona sísmica "0", que abrange aproximadamente 80% do território brasileiro. Essa zona é considerada de baixa sismicidade, o que reduz a aplicabilidade da norma em grande parte do país.

Segundo Hildenbrand (2017), o Brasil, embora terremotos sejam considerados raros, diversas ocorrências já foram registradas, como os tremores em João Câmara-RN no ano de 1986, com magnitude 5.1. Ainda assim, há a possibilidade de sismos com magnitudes superiores a 7,0, causando grande destruição em áreas habitadas em outras localidades. Nos cursos de engenharia no Brasil, o estudo de estruturas resistentes a sismos é pouco abordado, resultando em engenheiros não totalmente preparados para lidar com esse desafio. Embora o tema ainda não seja prioritário, regiões como o Norte, Centro-Oeste e Nordeste já sofreram com os efeitos de terremotos, comprometendo estruturas. A recente implementação da NBR 15421 – Norma Brasileira de Estruturas Resistentes a Sismos, apesar de ainda pouco utilizada devido à falta de conhecimento, garante a segurança das edificações.

Embora os terremotos sejam raros no Brasil, é essencial considerá-los no planejamento e execução das edificações. Aplicar conhecimentos técnicos e seguir as normas vigentes é fundamental para construir estruturas que proporcionem segurança à sociedade frente a eventos sísmicos excepcionais. Ocorrências passadas demonstraram que muitas construções não estavam preparadas para suportar abalos sísmicos, resultando em comprometimentos estruturais. Portanto, é indispensável conhecer e implementar técnicas e normas que garantam a segurança e a resistência das edificações, como as estabelecidas pela NBR 15421:2023.

A influência dos terremotos nas estruturas é um tema amplamente estudado em escala global, especialmente em áreas de alto risco sísmico. Atualmente, existe uma vasta literatura que abrange diversos métodos, critérios, requisitos e diretrizes para o dimensionamento sísmico adequado das estruturas, conforme as normas específicas de resistência sísmica de cada país.

Entretanto, muitas regiões ainda enfrentam terremotos sem considerar um projeto estrutural resistente a sismos necessário para mitigar os efeitos devastadores desse fenômeno natural, resultando na perda de vidas humanas e no comprometimento ou colapso das construções afetadas.

Com base na norma brasileira, NBR 15421:2023, este estudo compara as respostas encontradas pelo método das forças horizontais equivalentes (FHE) com as da análise modal para uma mesma estrutura. Os resultados foram obtidos através de simulações realizadas no software TQS. Propõe-se uma abordagem quantitativa para analisar dados, visando uma compreensão mais precisa dos parâmetros a serem estudados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Comparar os efeitos dos sismos na estrutura de uma edificação hipotética, especificamente os do método das forças horizontais equivalentes (FHE) e a análise do espectro modal (AEM), descritos na versão 2023 da ABNT NBR 15421 através dos efeitos provocados em alguns elementos estruturais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar forças horizontas equivalentes descritas na norma NBR 15421: 2023 para aplicação em um modelo hipotético;
- Realizar a análise dinâmica utilizando métodos quantitativos descrito na norma NBR 15421: 2023;
- Realizar análise dinâmica através de software de projeto e análise de estruturas de concreto;
- Analisar os valores obtidos em simulações para o método FHE e o método AEM realizados do software TQS em elementos estruturais de uma edificação hipotética.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1. ESTRUTURA DAS CAMADAS INTERNAS DA TERRA

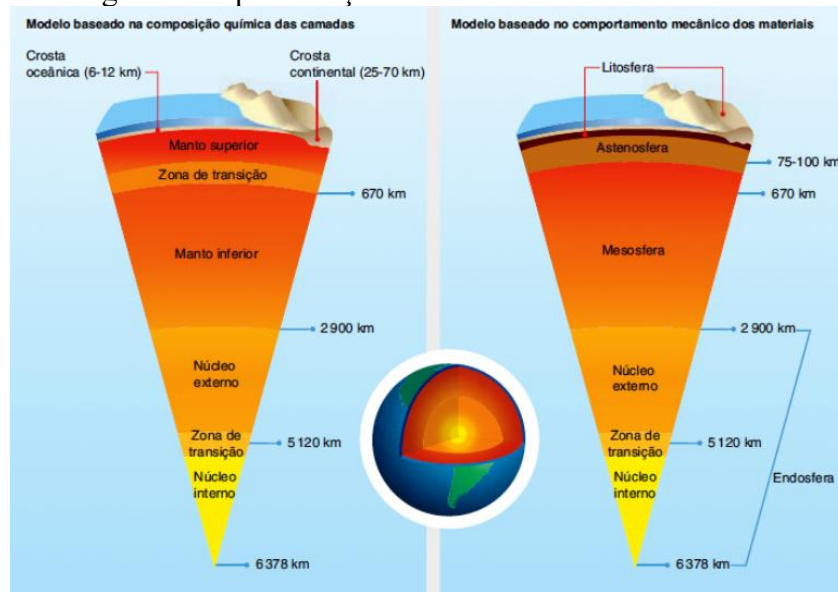
O conhecimento das camadas internas da Terra evoluiu através de estudos geológicos. Antes disso, a informação sobre essas camadas era limitada à superfície, observada por fotografias espaciais na década de 1950, e atualmente por satélites que fornecem dados mais detalhados.

Há séculos, filósofos como René Descartes tentavam imaginar a estrutura interna da Terra. No século XVII, Descartes descreveu o planeta como composto por um núcleo de matéria solar, camadas de compostos de manchas solares, terra densa, água, ar e uma camada fina de terra (Cardoso *et al.*, 2018).

Atualmente, a estrutura interna da Terra é compreendida através de modelos avançados que se baseiam em extensivos estudos e investigações científicas nas áreas de sismologia, geofísica, química e matemática. Os modelos predominantes são o químico e o físico. O modelo químico classifica a Terra em três camadas principais: crosta, manto e núcleo (Dias *et al.*, 2014). Dentro deste modelo, Toledo (2022) detalha que cada camada pode ser subdividida ainda mais: a crosta em crosta oceânica e continental; o manto em manto superior, zona de transição e manto inferior; e o núcleo em núcleo externo e núcleo interno.

Por outro lado, o modelo físico, que considera as propriedades de fluidez e rigidez das camadas terrestres, organiza a Terra em quatro camadas concêntricas: litosfera, astenosfera, mesosfera e endosfera (Dias *et al.*, 2014; Cardoso *et al.*, 2018). Este modelo é útil para entender as dinâmicas internas da Terra, como mostra a Figura 1, incluindo os processos de convecção e a interação entre diferentes camadas. Ambos os modelos fornecem uma visão abrangente da estrutura interna do planeta e são fundamentais para o avanço das geociências.

Figura 1: Representação das camadas internas da Terra.



Fonte: Google, 2024.

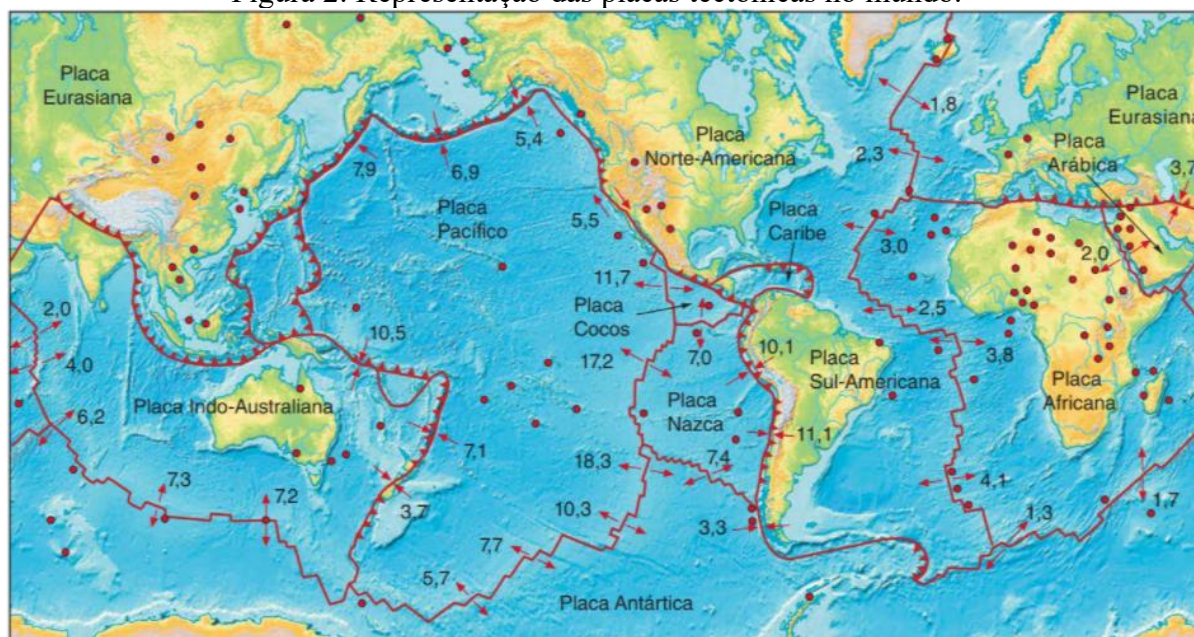
3.2. PLACAS TECTÔNICAS

A teoria das placas tectônicas, desenvolvida no século XX, baseia-se em hipóteses que explicam a formação e o movimento das grandes estruturas da superfície terrestre, conhecidas como placas tectônicas ou litosféricas, através dos processos internos da Terra (Duarte, 2019).

O movimento dessas placas, impulsionado pela astenosfera, resulta em fenômenos como separações, colisões ou deslizamentos laterais. Conforme Silva e Crispim (2019), os movimentos das placas são classificados em três tipos: divergentes, onde as placas se afastam e novas crostas oceânicas são formadas; convergentes, onde as placas colidem; e conservativos, onde as placas deslizam horizontalmente uma em relação à outra sem destruição ou criação de nova crosta oceânica ou continental.

As regiões com maior probabilidade de ocorrência de terremotos são aquelas localizadas nas bordas das placas tectônicas, denominadas regiões interplacas. Essas áreas apresentam uma alta concentração de eventos sísmicos, o que leva a um aumento no número de estudos nessas regiões, especialmente em países desenvolvidos (Justino, 2022). Dentre as placas tectônicas (Figura 2), tem-se as principais placas, que são: Eurásiana; Indo-Australiana; Antártica; Norte-Americana; Sul-Americana; Pacífico; e Africana.

Figura 2: Representação das placas tectônicas no mundo.



Fonte: Adaptado de Wicander & Monroe (2017).

Para as placas que são compostas pelo manto superior e a crosta oceânica, estas podem ter espessura superior a 100 km, enquanto as placas da crosta continental e manto superior, podem ter espessuras que chegam a serem superiores a 250 km de espessura (Wicander; Monroe, 2017).

3.3. SISMOS: MECANISMOS E CARACTERÍSTICAS

Os sismos, popularmente conhecidos como terremotos, são fenômenos naturais que resultam da liberação repentina de energia acumulada na crosta terrestre. Esse processo ocorre, geralmente, devido ao movimento das placas tectônicas, que se deslocam de forma contínua. Essas rupturas ocorrem devido ao acúmulo de tensões internas na Terra (Wicander & Monroe, 2017).

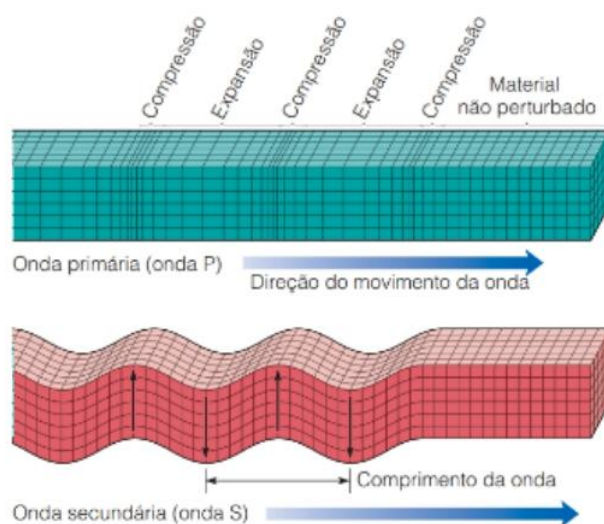
Os terremotos surgem principalmente em zonas de falhas, onde as placas tectônicas se encontram. Esses movimentos geram diferentes tipos de falhas, sendo as mais comuns a falha normal, a falha reversa e a falha transcorrente.

Quando a tensão gerada pelo movimento tectônico ultrapassa a resistência das rochas, ocorre a ruptura, e a energia armazenada é liberada na forma de ondas sísmicas. As ondas sísmicas se dividem em dois tipos principais: ondas de corpo, que se propagam pelo interior da Terra, e ondas de superfície, que se propagam na superfície terrestre e são responsáveis pela maior parte dos danos causados pelos terremotos.

O ponto de início da ruptura é chamado de foco ou hipocentro, e sua projeção na superfície é conhecida como epicentro. Conforme Souza (2017), a relação entre o hipocentro e os danos observados na superfície é inversa: quanto mais profundo o hipocentro, menores são os danos na superfície. Souza (2017) também explica que o epicentro é o ponto diretamente acima do hipocentro na superfície terrestre, e que a estimativa desses pontos utiliza equações que comparam as intensidades observadas com as variações de intensidade em função da distância e da magnitude.

Durante um terremoto, são gerados vários tipos de ondas sísmicas. Os tipos de vibrações gerados durante um terremoto são as ondas sísmicas P (primárias ou de compressão) e S (secundárias ou transversais), como mostra a Figura 3, e ainda pode-se ter as ondas de superfície (Nascimento, 2014). As ondas P causam vibrações que se movem na mesma direção da propagação da onda, o que resulta em um movimento de contração e expansão das camadas do solo na direção horizontal. Em contraste, as ondas S fazem com que as camadas do solo vibrem de forma perpendicular à direção em que as ondas se propagam, criando oscilações rápidas na vertical. As ondas P são mais rápidas que as ondas S, por isso chegam primeiro aos locais mais distantes do epicentro, enquanto as ondas S demoram um pouco mais para chegar (Wincander & Monroe, 2017).

Figura 3: Ondas primárias e secundárias.

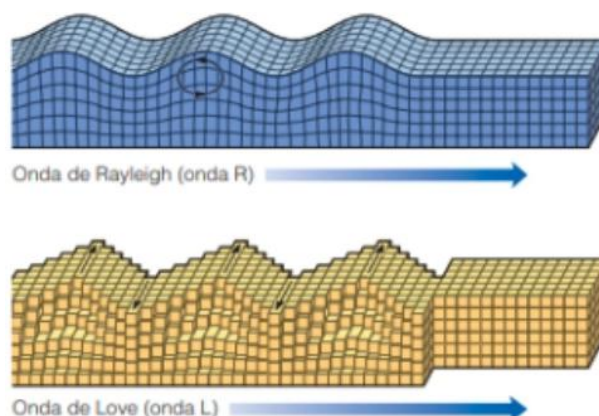


Fonte: Adaptado de Wicander & Monroe (2017).

Os sismólogos classificam vários tipos de ondas de superfície, com destaque para as ondas de Rayleigh e de Love. As ondas de Rayleigh (ondas R) fazem com que as partículas do

material afetado se movam em trajetórias elípticas em um plano vertical, seguindo a direção da propagação da onda. Já as ondas de Love (ondas L), que se assemelham às ondas S, provocam o movimento das partículas apenas para frente e para trás em um plano horizontal, perpendicular à direção de propagação da onda, observadas na Figura 4.

Figura 4: Ondas de Rayleigh e Love.



Fonte: Adaptado de Wicander & Monroe (2017).

3.3.1. Aparelhos e métodos para quantificar o sismo

Os sismos são fenômenos dinâmicos que apresentam diferentes características, como magnitude, intensidade e profundidade focal. A magnitude, que quantifica a energia liberada por um terremoto, é medida por escalas como a de Richter ou, mais comumente, na atualidade, a de magnitude de momento (M_w). A intensidade, por outro lado, mede os efeitos do terremoto na superfície e varia de acordo com a proximidade do epicentro e as condições locais do solo, sendo medida pela escala Mercalli Modificada (MM).

Além disso, os sismos podem ser classificados quanto à sua profundidade focal em rasos (até 70 km), intermediários (de 70 a 300 km) e profundos (acima de 300 km). Sismos rasos tendem a causar mais danos, pois as ondas sísmicas têm menor distância para se dissipar antes de atingir a superfície.

Para a realização das medidas, tem os equipamentos para fazer estas aferições, dentre eles temos os geofones e os sismógrafos, em que servem para registrar as ondas sísmicas e “Registram a intensidade das vibrações geradas na superfície e podem medir também a pressão acústica proveniente das detonações, gerando ao final um sismograma” (Pereira, 2018).

Para Matos, *et al.* (2011 *apud* Nascimento, 2014) os sismógrafos são utilizados para aferir a energia que é liberada durante o tremor e sem que ocorra interrupções no registro dos movimentos do solo, sendo que tal aparelho é constituído por um relógio com funcionalidade

de medir o exato momento em que se dá o início do fenômeno. Possuindo na atualidade diversos tipos de sismógrafos, como os hidrofones, geofones e os de pêndulo, sendo este último o mais utilizado.

3.3.2. Escala Richter

Desenvolvida por Charles Richter em colaboração com Beno Gutenberg em 1935, a escala de Richter, ou escala de magnitude local, é um sistema utilizado para quantificar a magnitude dos terremotos com base em sua manifestação na superfície (França, 2021). Segundo Spooner (2022), essa escala é logarítmica, o que implica que cada unidade representa uma magnitude dez vezes maior que a unidade anterior. Por exemplo, um terremoto de magnitude 4 na escala de Richter possui dez vezes mais energia do que um terremoto de magnitude 3 e cem vezes mais do que um de magnitude 2.

Embora a escala Richter seja amplamente utilizada, possui limitações. Até o momento, nenhum terremoto com magnitude igual ou superior a 10 foi registrado, sendo o maior evento documentado o terremoto de 1960 no Chile, com uma magnitude de 9,5. A escala é comumente aplicada a terremotos com magnitudes entre 0 e 9 graus. Uma limitação notável da escala é sua precisão para terremotos de grandes magnitudes; eventos com magnitudes superiores a 7 frequentemente apresentam características semelhantes, o que pode dificultar a distinção precisa entre terremotos de magnitudes muito altas (Spooner, 2022).

Tabela 1: Caracterização da Escala Richter.

MAGNITUDE	DESCRIÇÃO	ENERGIA LIBERADA	EXEMPLO
0 - 1	Microterremoto	Extremamente baixa	Normalmente não sentido
1 - 2	Pequeno	Baixa	Pequenas rachaduras em construções
2 - 3	Leve	Moderada	Sentido por algumas pessoas
3 - 4	Moderado	Significativa	Possível dano a estruturas frágeis
4-5	Forte	Alta	Dano a construções malfeitas
5 - 6	Muito forte	Muito alta	Dano significativo, possível colapso
6 - 7	Grande	Muito alta	Dano severo, possível destruição em áreas urbanas
7 - 8	Violento	Extremamente alta	Destruição generalizada em áreas extensas
8 - 9	Catastrófico	Enorme	Evento histórico com impacto global
> 9	Extremamente Catastrófico	Máximo	Registro raro, como o terremoto de 1960 no Chile (9,5)

Fonte: Baseado em França (2021) e Spooner (2022).

3.3.3. Escala Mercalli

Para a avaliação da intensidade dos terremotos, utiliza-se a Escala Mercalli, inicialmente proposta por Giuseppe Mercalli em 1902. Esta escala foi posteriormente revisada em 1956, passando a ser conhecida como Escala Mercalli Modificada, que é amplamente empregada, apesar de sua natureza qualitativa e subjetiva. A intensidade é determinada com base nos efeitos observados sobre a população e as estruturas, não sendo diretamente proporcional à magnitude do evento sísmico. Assim, pode haver situações em que terremotos de diferentes magnitudes apresentem a mesma intensidade, ou magnitudes iguais resultem em intensidades variadas (Defiltro, 2018).

Nascimento (2014) relata que a Escala Mercalli foi criada para avaliar os danos causados aos habitantes e às construções. A intensidade dos terremotos é fortemente influenciada pela localização do epicentro, com variações significativas à medida que se afasta do ponto de maior intensidade.

Tabela 2: Caracterização da Escala Mercalli.

INTENSIDADE	DESCRIÇÃO DOS EFEITOS	IMPACTOS NAS ESTRUTURAS
I	Terremoto não sentido pelas pessoas.	Nenhum impacto.
II	Sentido por algumas pessoas em repouso, normalmente em andares superiores.	Nenhum impacto.
III	Levemente perceptível; vibrações semelhantes às de um caminhão próximo.	Sem danos.
IV	Claramente sentido em Ambientes internos; janelas, portas e louças tremem.	Sem danos estruturais; leve oscilação de objetos.
V	Sentido por muitas pessoas; pequenos objetos deslocados, leve movimento de móveis.	Danos leves em estruturas frágeis.
VI	Sentido por todos; queda de gesso e fissura nas paredes.	Danos leves a moderados em estruturas mal construídas.
VII	Sentido fortemente; rachaduras no solo, objetos pesados movem-se.	Danos moderados em edifícios bem construídos; graves em estruturas fracas.
VIII	Danos graves; colapso parcial de estruturas fracas; ruptura do solo visível.	Estruturas comuns sofrem danos severos; colapso em edificações frágeis.
IX	Ruptura significativa do solo; colapso em estruturas fracas.	Danos severos a quase todas as estruturas, mesmo as bem construídas
X	Colapso generalizado; grandes deformações no solo.	Quase todas as estruturas sofrem colapso total.
XI	Destruição quase completa de construções; grandes fendas no solo.	Destruição generalizada; pontes e grandes edificações colapsam.
XII	Destruição total; deformação extrema do solo e objetos lançados no ar.	Colapso completo de todas as estruturas; mudanças significativas na paisagem.

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

3.4. REGIÕES MAIS SUSCEPTÍVEIS AOS SISMOS

As regiões com maiores probabilidades de sofrerem terremotos, são onde ocorre o encontro entre as placas tectônicas, tendo uma grande concentração de eventos sísmicos nas bordas das placas, em que são chamadas de regiões interplacas, levando a uma maior preocupação em realizar estudos nessas regiões, sobretudo nos países desenvolvidos, onde o fator econômico, além de tecnologias facilitam o desenvolvimento de pesquisas. Além das regiões interplacas, tem as ditas intraplacas, onde a ocorrência dos eventos sísmicos acontece em menores quantidades, consequentemente não ocorre uma concentração de estudos sismológicos (Parisenti, 2011).

3.5. HISTÓRICO DOS SISMOS

3.5.1. No Mundo

Em um cenário em que a atividade sísmica global se torna cada vez mais relevante para a compreensão dos riscos naturais, é importante destacar que, conforme observado por Nascimento (2014), cerca de 1.000 sismos com magnitudes entre 2,0 e 2,9 na escala Richter ocorriam diariamente em todo o mundo. Embora sismos com magnitudes inferiores a 2,0 também fossem frequentes, eles ocorrem com menor regularidade. Estudos mostram que sismos com magnitudes entre 9,0 e 9,9 são eventos extremamente raros.

O terremoto de Lisboa, ocorrido em novembro de 1755, destacou-se como um dos primeiros eventos sísmicos a ser analisado cientificamente. O desastre, que foi seguido por um tsunami devastador, resultou na quase total destruição da cidade. Este evento levou a um aumento do interesse científico na Europa, com um foco renovado no estudo dos terremotos e no desenvolvimento de técnicas para a construção de edifícios resistentes a tais fenômenos. Em 1880, foram criados os primeiros sismógrafos, e em 1889, na cidade de Potsdam, na Alemanha, foi estabelecida a primeira conexão segura entre um sismograma e um terremoto distante, ocorrido no Japão em 18 de abril (Vitorio, 2022).

O terremoto mais intenso já registrado ocorreu no Chile em 1960, com uma magnitude de 9,5 na escala Richter. Este evento resultou na morte de mais de duas mil pessoas e causou enormes danos materiais. Além disso, o terremoto gerou um tsunami que atravessou o Oceano Pacífico, atingindo o Japão.

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

3.5.2. No Brasil

De acordo com França (2021), o Brasil está localizado no interior da Placa Sul-Americana, com sua costa leste distante da borda da placa e a maior parte de seu território centralizada no interior desta placa. A Placa Sul-Americana é a menor entre as sete grandes placas tectônicas, abrangendo aproximadamente 32 milhões de km². Sua borda ocidental está em convergência com a Placa de Nazca, a qual é responsável pelos eventos sísmicos na região da Cordilheira dos Andes.

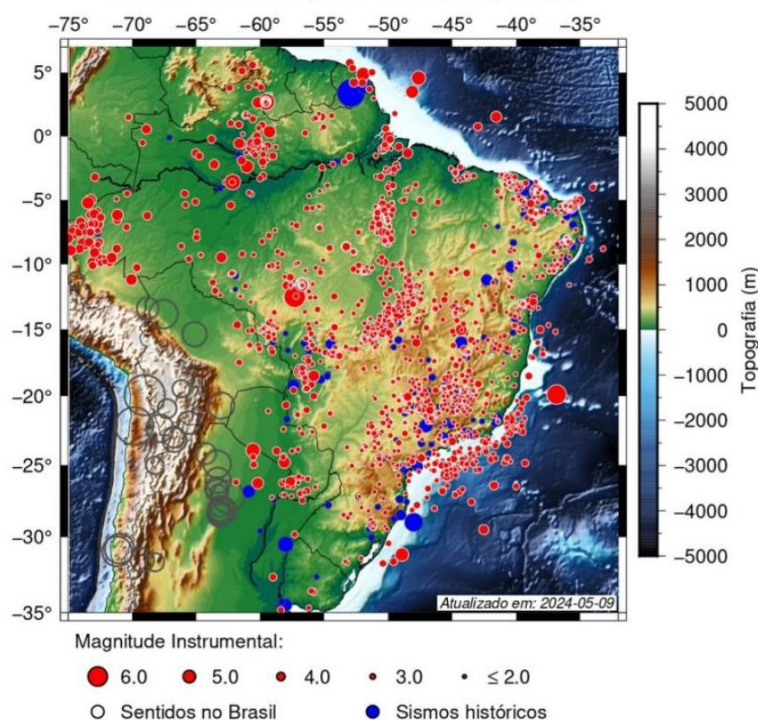
Ainda que os sismos sejam frequentemente associados a regiões com alta atividade sísmica, o Brasil também experimenta esses fenômenos e deve atribuir-lhes a devida importância. A percepção de que os terremotos são raros ou de baixa magnitude no país não diminui a necessidade de preparação e precaução. Mesmo que a frequência e a intensidade dos sismos no Brasil sejam relativamente baixas, é fundamental garantir a segurança das pessoas e a capacidade estrutural das edificações para suportar esses eventos. Preparar-se adequadamente é uma estratégia importante e que deve ser pensada para mitigar os riscos e assegurar a integridade das estruturas em face de qualquer eventualidade sísmica (Justino, 2022).

O Brasil já experimentou diversos tremores de terra. Apesar desses eventos serem, geralmente, de menor magnitude em comparação com as regiões mais ativas sismicamente do mundo, isso não exclui a possibilidade de sismos de maior escala. Mesmo situado distante das bordas das placas tectônicas, o Brasil pode ser afetado por tensões geológicas que atuam em toda a placa Sul-Americana. Portanto, a ocorrência de terremotos de magnitude 7, embora rara, é uma possibilidade real e pode resultar em danos significativos a áreas habitadas ou suas proximidades. Essa realidade deve ser considerada seriamente para garantir a adequação das estruturas e a segurança das populações (Hildenbrand, 2017).

Hildenbrand (2017), relata que, um dos maiores terremotos registrados no Brasil teve magnitude 6,2 e ocorreu em 1955 no norte de Mato Grosso, uma área pouco habitada na época. Outro evento sísmico de grande impacto foi um sismo de magnitude 6,5 em 1885 na fronteira entre o Amapá e a Guiana Francesa. Há também um possível terremoto de magnitude 7 no Amazonas em 1690. Em 2007, um tremor de magnitude 5 no norte de Minas Gerais causou o desabamento de casas em Itacarambi e a morte de uma criança, evidenciando que até sismos de menor magnitude podem provocar danos graves em áreas densamente povoadas. É possível entender as regiões mais afetadas pelos terremotos através da Figura 5, a seguir.

Figura 5: Mapa do histórico de sismos no Brasil.

Sismos no Brasil (1720-2023, mag $\geq 2,5$)



Fonte: Adaptado de RSBR (2023).

3.6. NORMA BRASILEIRA PARA PROJETOS DE ESTRUTURAS RESISTENTES A SISMOS – ABNT NBR 15421:2023

No início dos anos 2000, o avanço da comunidade técnica brasileira resultou na publicação de importantes normas de projeto estrutural, incluindo a NBR 6118, NBR 14432, NBR 15200 e NBR 15421, algumas delas inéditas. Essas normas abriram caminho para que, em 2008, a NBR 6118 fosse reconhecida pela ISO (International Organization for Standardization) como um documento de validade internacional. Com o objetivo de modernizar essas regulamentações, várias foram revisadas a partir de 2020, entre elas a NBR 15421, que trata de projetos de estruturas resistentes a sismos. (Nóbrega *et al.*, 2022).

A primeira versão da norma brasileira ABNT NBR 15421, foi lançada em 2006. No começo dos anos 2000, esse assunto era visto como algo complicado e restrito apenas a alguns projetos específicos. No entanto, com o tempo, a norma tem se tornado cada vez mais importante e aplicada, tanto em estudos acadêmicos quanto em projetos de engenharia atuais, devido à crescente preocupação com a segurança de construções em áreas suscetíveis a tremores.

Segundo Nóbrega *et al.* (2022), dois fatores limitam seu conhecimento e aplicação: a exclusão de estruturas especiais como obras hidráulicas e a isenção de requisitos para áreas na zona sísmica "0", que cobre cerca de 80% do Brasil.

Em 2023, a NBR 15421 foi revisada e sua segunda edição publicada. De acordo com Nóbrega *et al.* (2022), essa nova versão trouxe duas mudanças principais: correções no mapa de perigo sísmico e ajustes no formato do espectro de resposta de projeto, visando melhorar a precisão das diretrizes para projetos estruturais em áreas suscetíveis a terremotos.

3.6.1. Zonas sísmicas

Para definir as ações sísmicas, a norma estabelece um zoneamento sísmico que classifica o território brasileiro em cinco zonas. Cada uma dessas zonas é definida com base na variação da aceleração sísmica horizontal característica. A norma também destaca que esses valores são normalizados para a classe de terreno B, que corresponde a solos do tipo rochoso. Essa classificação pode ser observada na Tabela 3.

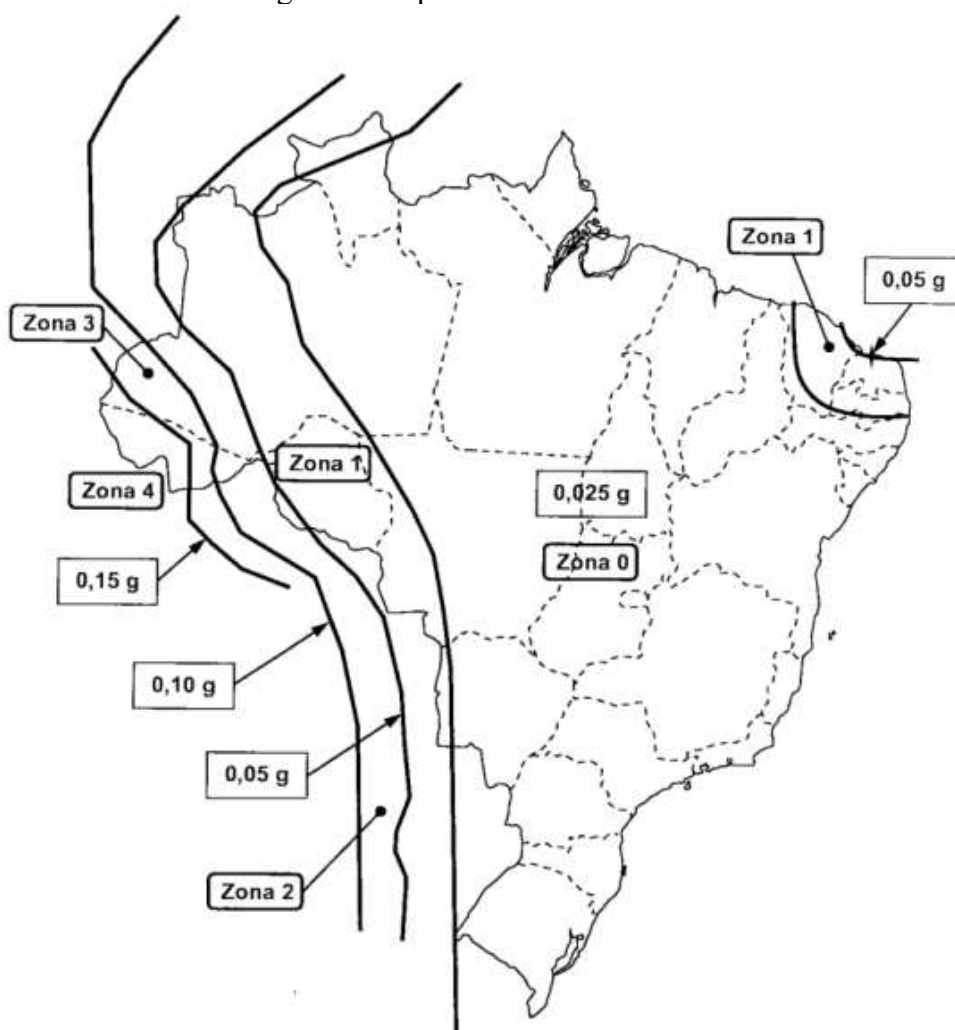
Tabela 3: Zonas sísmicas.

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: ABNT, 2023.

Através da Figura 06, é possível visualizar as áreas correspondentes a cada zona sísmica no território brasileiro. Essas faixas delimitam as regiões de acordo com o nível de aceleração sísmica característico de cada zona, conforme estabelecido pela norma.

Figura 6: Mapa das Zonas Sísmicas.



Fonte: ABNT, 2023.

3.6.2. Classe do solo

A norma brasileira classifica os tipos de solo em seis categorias: rocha sã, rocha, rocha alterada ou solo muito rígido, solo rígido e solo mole. Para classificar o solo mole, são necessários parâmetros específicos. Nas demais categorias, a avaliação é baseada no número médio de golpes obtidos no ensaio de penetração padrão (SPT) e na velocidade média de propagação das ondas sísmicas no solo. Os detalhes dessa classificação e seus parâmetros podem ser encontrados na Tabela 4, que orienta os profissionais sobre como aplicar esses critérios na prática.

Tabela 4: Classe do terreno para projetos resistentes a sismos.

CLASSE DO TERRENO	DESIGNAÇÃO DA CLASSE DO TERRENO	PROPRIEDADES MÉDIAS PARA OS 30 METROS SUPERIORES DO TERRENO	
		$\underline{V}_S$	$\underline{N}$
A	Rocha sã	$\underline{V}_S \geq 1500 \text{ m/s}$	(não aplicável)
B	Rocha	$1500 \text{ m/s} \geq \underline{V}_S \geq 760 \text{ m/s}$	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	$760 \text{ m/s} \geq \underline{V}_S \geq 370 \text{ m/s}$	$\underline{N} \geq 50$
D	Solo rígido	$370 \text{ m/s} \geq \underline{V}_S \geq 180 \text{ m/s}$	$50 \geq \underline{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\underline{V}_S \leq 180 \text{ m/s}$	$\underline{N} \leq 15$
	-	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 liquefazíveis, 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

Segundo a NBR 15421 (2023), "o espectro de resposta de projeto, $S_a(T)$, para acelerações horizontais, representa a resposta elástica de um sistema com um grau de liberdade e um amortecimento crítico de 5%". A norma fornece equações específicas (Equações 1 e 2) para calcular as acelerações a_{gs0} e a_{gs1} , que são essenciais para avaliar as forças sísmicas que atuarão nas estruturas, descritas a seguir.

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

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

Onde:

- As acelerações espectrais, a_{gs0} e a_{gs1} , correspondem aos valores calculados para os períodos de 0,0s e 1,0s, respectivamente, já levando em consideração o efeito da amplificação sísmica do solo;

- Os fatores C_a e C_v representam a amplificação sísmica do solo para os períodos de 0,0s e 1,0s, respectivamente, conforme indicado na Tabela 3 da NBR 15421 e observado na Tabela 5. Esses fatores dependem da aceleração característica de projeto a_g e da classe do terreno.

Tabela 5: Fatores de amplificação sísmica do 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: Adaptado da ABNT, 2023.

A NBR 15421 também define que o espectro de resposta de projeto $S_a(T)$ deve ser calculado com base em quatro faixas distintas de períodos, conforme estabelecido pelas Equações 3, 4, 5 e 6.

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

$$\text{Para } 0,04 \cdot \frac{C_v}{C_a} \leq T \leq 0,03 \cdot \frac{C_v}{C_a} \quad S_a(T) = 2,5 \cdot a_{gs0} \quad (4)$$

$$\text{Para } 0,03 \cdot \frac{C_v}{C_a} \leq T \leq 2,0 \cdot \frac{C_v}{C_a} \quad S_a(T) = (a_{gs1}/T) \quad (5)$$

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

3.6.4. Categorias de utilização e fatores de importância de utilização

Dependendo do tipo de estrutura da edificação, é essencial definir a categoria de utilização, conforme estabelecido pela Tabela 6, que classifica as edificações em três categorias distintas. Além disso, é necessário determinar o fator de importância de utilização, que influencia diretamente no projeto estrutural.

Para edificações com múltiplos tipos de ocupação em uma mesma área, a norma exige que se adote a categoria de utilização mais elevada para todo o projeto, garantindo maior segurança. A seguir, na Tabela 6, são apresentadas as categorias de utilização para diferentes tipos de edificações, baseadas na ocupação.

Tabela 6: Definição das categorias de utilização e dos 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
III	Estruturas especificadas como essenciais, incluindo, mas não se limitando, ao 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, 2023.

3.6.5. Categoria sísmica

A NBR 15421:2023 estabelece que, para cada tipo de estrutura, deve-se definir uma categoria sísmica, que leva em consideração a zona sísmica em que a edificação está localizada. Essas categorias são essenciais para a definição dos critérios de projeto sísmico, pois determinam as exigências de segurança e os parâmetros de dimensionamento de acordo com o risco sísmico da região. Tais categorias são descritas 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, 2023.

Na categoria sísmica A, as exigências variam conforme a zona sísmica. Para estruturas localizadas na zona sísmica 0, onde a sismicidade é muito baixa, não há necessidade de considerar resistência sísmica. No entanto, na zona sísmica 1, as edificações devem ser projetadas para resistir a forças sísmicas horizontais em duas direções ortogonais e para suportar esforços de torção. Além disso, cada piso da construção será submetido a forças horizontais, e a estrutura deve ser capaz de suportá-las adequadamente (ABNT NBR 15421: 2023). A força é calculada pela seguinte equação:

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

Onde:

F_x é a força sísmica de projeto correspondente ao piso x;

w_x é o peso efetivo da estrutura no piso x.

Para o cálculo do peso total, deve-se adicionar um acréscimo de 25% da carga acidental em áreas destinadas a estacionamento e armazenamento. Esse fator de correção visa garantir que a estrutura suporte adequadamente as cargas adicionais esperadas nessas zonas, prevenindo falhas e assegurando a integridade da edificação.

Diferentemente da categoria sísmica A, as categorias B e C podem ser analisadas por métodos específicos, como o método FHE. Este método e a análise modal com espectros de resposta AEM serão o foco ao longo do presente trabalho, conforme estabelecido pela ABNT NBR 15421:2023.

3.6.6. Análise sísmica pelo método das forças horizontais equivalentes

O método FHE baseia-se na ideia de que as forças sísmicas que atuam em uma estrutura podem ser representadas por forças horizontais equivalentes. Essas forças são calculadas para simular a ação sísmica de maneira que a estrutura possa resistir ao movimento do solo durante um terremoto. É uma ferramenta para engenheiros que projetam edificações em regiões suscetíveis a terremotos. Ao transformar a ação sísmica em forças horizontais equivalentes, os profissionais conseguem garantir a segurança estrutural e minimizar os riscos associados a eventos sísmicos. Esse método, embora simplificado, é uma alternativa eficiente para o desenvolvimento de construções mais seguras e resilientes.

3.6.6.1. Força Horizontal Total

A força horizontal total na base da estrutura, em uma determinada direção, é calculada conforme a NBR 15421: 2023, pela seguinte expressão:

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

Onde:

H é a força horizontal total;

C_S é o coeficiente de resposta sísmica;

W é o peso efetivo da estrutura.

O coeficiente de resposta sísmica C_S , é determinado pela Equação 9:

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

Onde:

a_{gs0} é aceleração espectral para o período de 0,0s definida do item 3.6.3 deste trabalho;

g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

I é o fator de importância de utilização (Tabela 6);

R é o coeficiente de modificação de resposta.

O coeficiente de modificação de resposta R é obtido pela Tabela 8, da ABNT NBR 15421:2023, descrita a seguir.

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

SISTEMA BÁSICOS SISMORESISTENTE	COEFICIENTE DE MODIFICAÇÃO DA RESPOSTA (R)	COEFICIENTE DE SOBRERRESISTÊNCIA (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, 2023.

O coeficiente de resposta sísmica, determinado pela Equação 10, deve ser inferior ao valor obtido pela Equação 9, conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 15421:2023.

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

Onde:

a_{gs0} é aceleração espectral para o período de 1,0s definida do item 3.6.3 deste trabalho;

g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

T é o 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.

Esse requisito é fundamental para garantir que a resposta sísmica calculada esteja dentro dos limites seguros, ajustando as forças atuantes de maneira que a estrutura possa resistir adequadamente aos efeitos dos tremores. Dessa forma, assegura-se a integridade estrutural frente a eventos sísmicos, conforme previsto na norma.

3.6.6.2. Determinação do período

O período natural da estrutura pode ser determinado através da extração modal. No entanto, quando essa abordagem não for viável, o período natural aproximado T_a pode ser obtido utilizando a Equação 10, conforme descrito na NBR 15421.

$$T_a = C_T \cdot h_n^x \text{ (s)} \quad (11)$$

Sendo h_n a altura da estrutura, em metros (m), medida a partir da base, os valores C_T e de x são determinados conforme a tipologia estrutural e definidos pela norma, como será mostrado a seguir.

- $C_T = 0,0724$ e $x = 0,8$: para estruturas em que 100% das forças sísmicas horizontais são resistidas por pórticos de aço momento-resistentes, sem a presença de sistemas mais rígidos que limitem sua deformação sob ação sísmica;
- $C_T = 0,0466$ e $x = 0,9$: para estruturas em que 100% das forças sísmicas horizontais são resistidas por pórticos de concreto, também sem restrições à deformação devido a sistemas mais rígidos;

- $C_T = 0,0731$ e $x = 0,75$: para estruturas com pórticos de aço contraventados com treliças;
- $C_T = 0,0488$ e $x = 0,75$: aplicável a todas as demais estruturas.

De acordo com a norma ABNT NBR 15421, o período avaliado por extração modal, em cada direção da estrutura, não pode exceder o valor resultante do produto entre o coeficiente de limitação do período C_{up} , definido na Tabela 9, e o período natural aproximado T_a . O coeficiente C_{up} , é estabelecido com base na zona sísmica em que a estrutura se encontra, como mostra a Tabela 9, limitando o período para garantir uma resposta adequada às forças sísmicas em diferentes condições geográficas.

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, 2023.

3.6.6.3. Distribuição vertical das forças sísmicas

A força horizontal total H , aplicada na base da estrutura, é distribuída verticalmente entre os diferentes pavimentos. Em cada nível (piso da edificação) x , é aplicada uma força F_x , conforme a norma, utilizando a expressão:

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

Onde C_{vx} é a representação do coeficiente de distribuição vertical, determinado pela Equação 13, a seguir:

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

Onde:

C_{vx} é o coeficiente de distribuição vertical;

W_x e W_i são as parcelas do peso efetivo total que correspondem às elevações i ou x , respectivamente (a depender das direções estabelecidas no projeto);

h_i e h_x são as alturas entre a base e as elevações i ou x , respectivamente;

K é o expoente de distribuição, relacionado ao período natural da estrutura T , com os seguintes valores:

- 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, $k = 2$.

3.6.7. Análise sísmica pelo método espectral

A análise sísmica pelo método espectral, também conhecida como AEM, é uma técnica utilizada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura submetida a ações sísmicas, considerando suas características modais. Esse método é amplamente utilizado em projetos estruturais, pois leva em conta as frequências naturais da estrutura e como ela responde a essas frequências quando exposta a um evento sísmico. É importante para garantir a segurança e o desempenho adequado das estruturas em regiões suscetíveis a sismos, proporcionando uma análise dinâmica que reflete fielmente o comportamento da edificação frente às forças sísmicas.

3.6.7.1. Número de modos a ser considerado

De acordo com a ABNT NBR 15421, o número de modos considerado na análise espectral deve ser suficiente para garantir que pelo menos 90% da massa efetiva seja capturada em cada uma das direções ortogonais analisadas. Isso assegura que a resposta dinâmica da estrutura seja adequadamente representada, incluindo os efeitos das diferentes frequências de vibração, permitindo uma análise mais precisa e segura do comportamento da edificação frente às ações sísmicas.

3.6.7.2. Respostas modais para o projeto

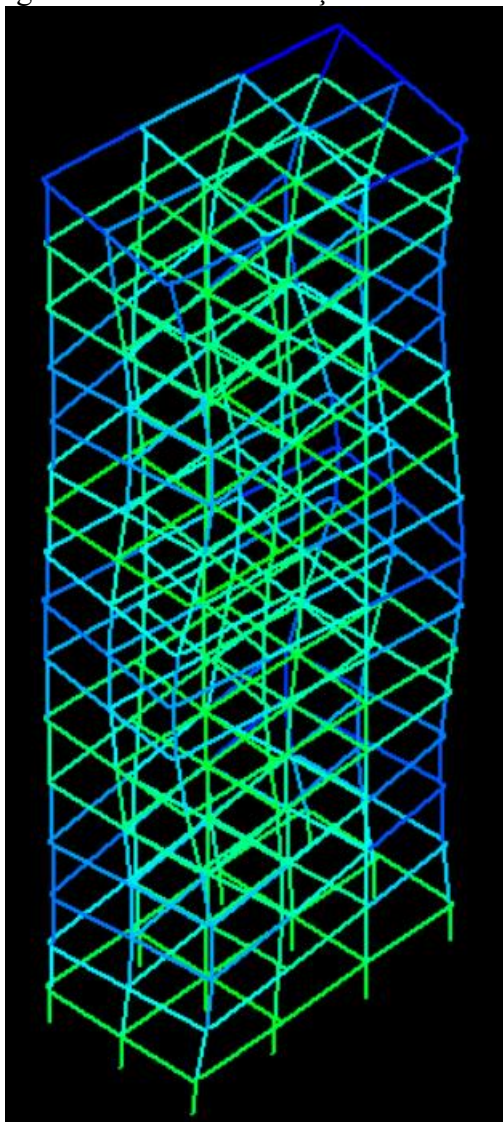
O espectro de projeto, conforme estabelecido na seção 6.3 da norma, deve ser considerado nas direções ortogonais analisadas. Em um projeto sísmico, é fundamental que todas as respostas modais, que incluem forças, momentos e reações de apoio, sejam

multiplicadas pelo fator I/R , onde I representa o fator de importância da estrutura e R é o coeficiente de resposta.

Além disso, as respostas obtidas em termos de deslocamentos, tanto absolutos quanto relativos, devem ser ajustadas pelo fator C_d/R . O fator C_d é o coeficiente de comportamento, que reflete a capacidade da estrutura de dissipar energia durante um evento sísmico.

Esses ajustes são realizados visando garantir que o projeto esteja em conformidade com as exigências normativas e que a estrutura tenha a capacidade de resistir adequadamente às forças sísmicas. Eles permitem que os engenheiros considerem não apenas as características da estrutura, mas também sua importância e comportamento durante eventos sísmicos. A figura 7 seguir, ilustra o comportamento dos modos de vibração da estrutura quando submetida a cargas sísmicas geradas pela análise através do AEM.

Figura 7: Modos de vibração da estrutura.



Fonte: Autor, 2024.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada a composição dos elementos que constituem o estudo, iniciando com uma explanação da análise bibliográfica realizada sobre o tema. Em seguida, será feita uma breve descrição da edificação hipotética utilizada como base para as análises subsequentes, detalhando suas principais características e relevância dentro do contexto do estudo sísmico. Para compreender os efeitos de sismos nas edificações, foi realizada uma pesquisa bibliográfica inicial, visando adquirir conhecimento sobre a natureza dos tremores de terra e seus impactos estruturais. Após o estudo detalhado da norma técnica para o projeto de estruturas resistentes a sismos, optou-se por analisar esses efeitos em cenários hipotéticos. Utilizando o software TQS, foi feita a modelagem de uma edificação como exemplo, aplicando dois métodos de análise sísmica: o das forças horizontais equivalentes e o espectral. No método das FHE, parâmetros foram calculados para determinar as forças horizontais aplicadas em cada pavimento, com base nas características da estrutura e nos requisitos normativos (ABNT NBR 15421:2023).

4.1. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento deste trabalho iniciou-se com uma pesquisa bibliográfica voltada à compreensão dos sismos e suas implicações nas estruturas. Esse levantamento teórico, que incluiu a consulta a livros, artigos científicos, monografias, teses e normas técnicas, foi essencial para entender os principais efeitos dos sismos nas edificações, como deslocamentos, tensões e possíveis falhas estruturais. A partir desse estudo, foi possível consolidar as informações necessárias para a análise das forças sísmicas e do comportamento das edificações sob abalos, fornecendo um embasamento sólido para as próximas etapas da pesquisa.

Além disso, foi conduzido um estudo detalhado da ABNT NBR 15421:2023, que aborda o projeto de estruturas resistentes a sismos, servindo como base para a análise dos efeitos sísmicos. Conforme observado por Nóbrega *et al.* (2022), as principais atualizações nas novas diretrizes incluem a revisão do mapa de perigo sísmico e modificações no formato do espectro de resposta de projeto, proporcionando uma maior precisão nas análises estruturais frente a eventos sísmicos.

O estudo adota uma abordagem quantitativa, uma vez que busca coletar e analisar dados por meio de cenários hipotéticos. Esses cenários são elaborados para explorar os efeitos de sismos em edificações, com o objetivo de avaliar as respostas estruturais em termos de

deslocamentos, tensões e deformações (Justino, 2022). A quantificação dos dados permite comparar diferentes parâmetros, como a distribuição das forças sísmicas e a resistência estrutural em diversas situações. Isso possibilita atender ao objetivo de verificar a adequação dos métodos de análise sísmica e as normas técnicas aplicáveis ao contexto brasileiro.

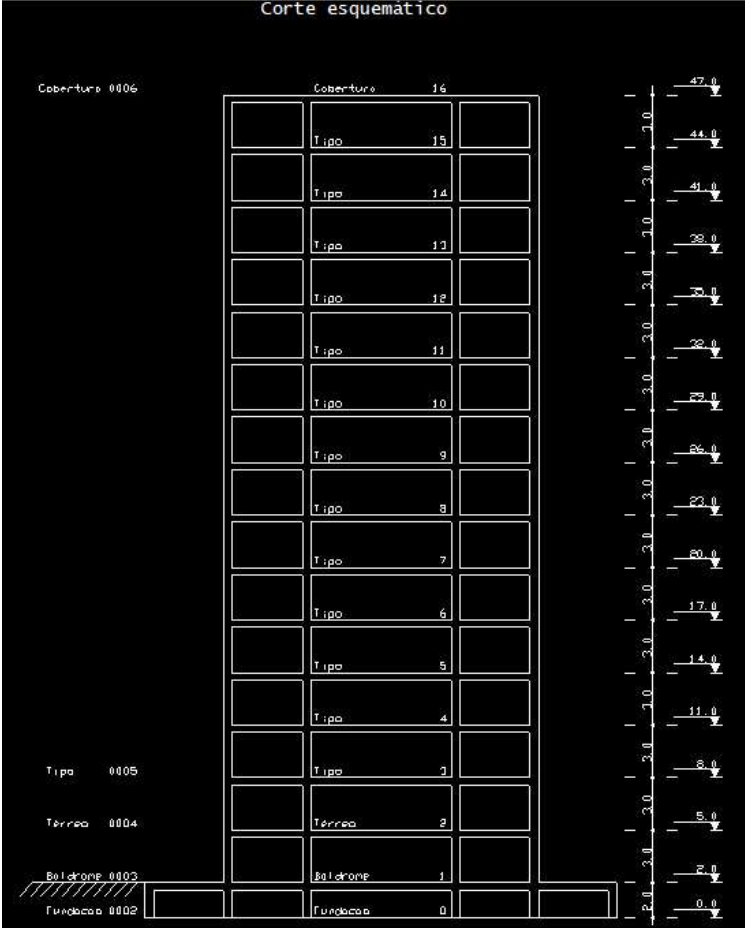
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO HIPOTÉTICO SIMULADO

4.2.1. Descrição da edificação

A caracterização da edificação e as considerações sobre o modelo simulado envolvem uma descrição detalhada da estrutura a ser analisada e dos parâmetros utilizados na modelagem sísmica. Para este estudo, a edificação hipotética foi modelada com base em um edifício típico de múltiplos pavimentos, com características comuns em regiões urbanas brasileiras, proposto por Justino (2022). Optou-se por utilizar a região de Pau dos Ferros-RN, para este estudo. O modelo foi desenvolvido utilizando o software de análise estrutural TQS, que permite a simulação de respostas estruturais frente a ações sísmicas e outros carregamentos.

A modelagem considerou aspectos essenciais, adaptado semelhante ao proposto por Justino (2022), como o tipo de material utilizado, concreto armado com resistência característica (F_{ck}) de 40MPa, a altura total do edifício de 47m, o número de 16 pavimentos: fundação no nível 0, baldrame com 2m, térreo com 3m, pavimento tipo com 13 pisos de 3m, e cobertura com 3m, conforme a Figura 8 e a distribuição das cargas nos diferentes níveis da estrutura.

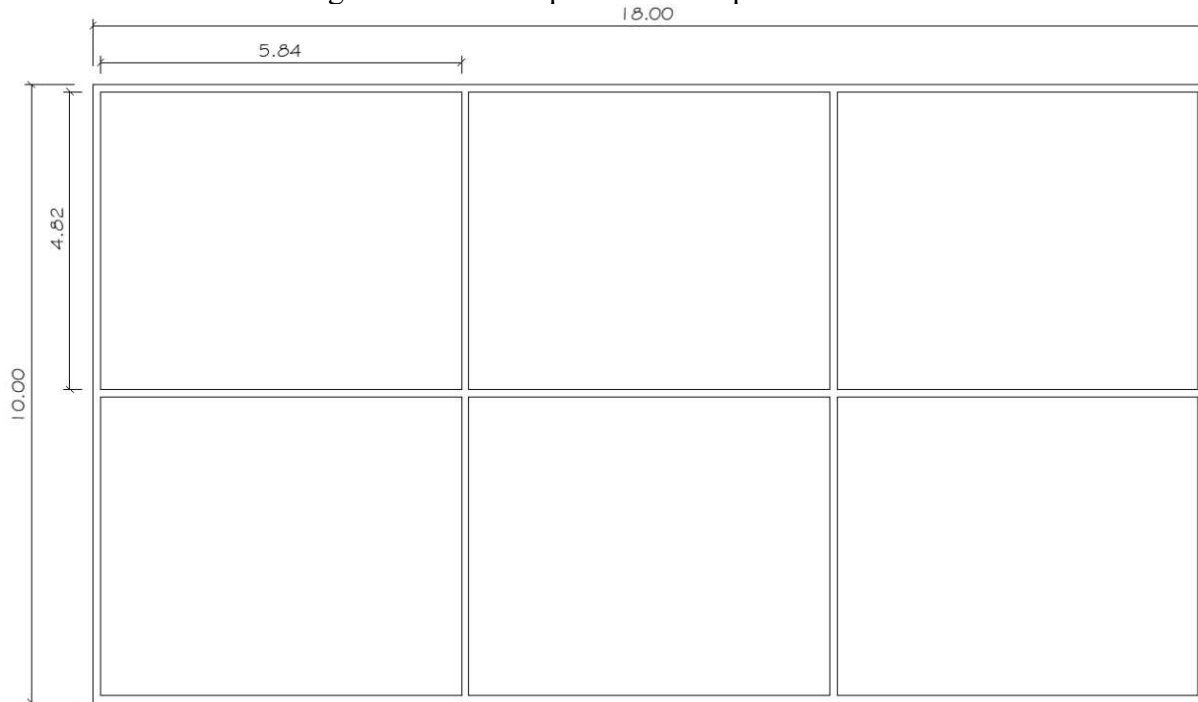
Figura 8: Corte esquemático da edificação.



Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

As dimensões do modelo adaptado da estrutura foi de 18m de largura por 10m de profundidade considerando os eixos x e y, foram aplicadas a todos os pavimentos, como pode ser observado na Figura 9. O peso de cada um foi determinado como igual para todos, conforme a norma pertinente. As cargas do peso próprio da estrutura hipotética, a serem consideradas, são dos pilares, das vigas, das lajes, da alvenaria, e do revestimento.

Figura 9: Planta esquemática dos pavimentos.



Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

4.2.2. Pré-dimensionamento dos elementos estruturais

Para definir o peso próprio da estrutura, foi realizado um pré-dimensionamento dos elementos estruturais conforme as diretrizes da ABNT NBR 6118:2023. De acordo com essa norma, os pilares não devem possuir uma área de seção transversal inferior a 360 cm². Para verificar a área dos pilares, utilizou-se as equações 14 e 15, garantindo que o dimensionamento dos elementos estruturais atenda aos requisitos de resistência e segurança estabelecidos pela norma. Esse processo é fundamental para assegurar que os pilares suportem adequadamente as cargas da estrutura, conforme as diretrizes normativas.

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

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

Onde:

A_{pi} é a área do pilar i ;

P_i é a carga estimada do pilar i ;

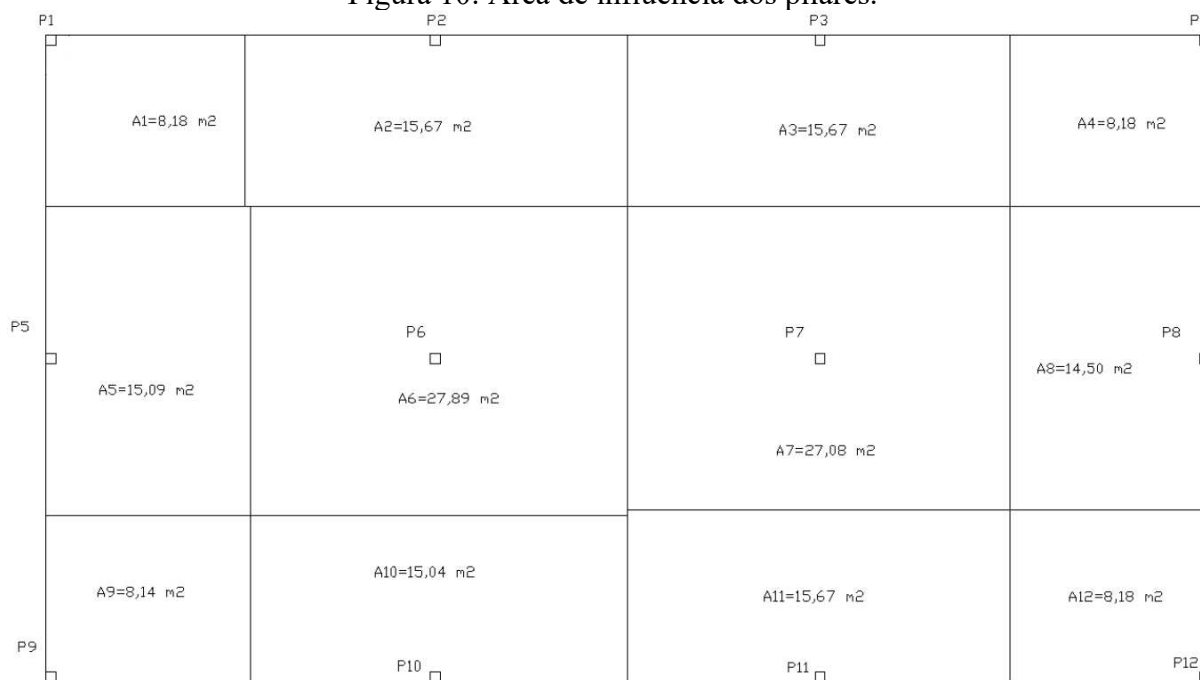
n é o número de pavimentos com valor máximo de 15 pavimentos fixado;

q_{pvto} é a estimativa de carga que atua no pavimento, adotando valores de $12 \text{ kN/m}^2 = 1223,66 \text{ kgf/m}^2$;

A_i é a área de influência do pilar i ;

Para determinar a área de influência dos pilares da edificação, foi utilizado o software AutoCAD 2024, que facilitou a divisão precisa das 12 áreas correspondentes a cada pilar. A distribuição dessas áreas de influência é essencial para o correto dimensionamento estrutural, pois permite avaliar as cargas distribuídas que cada pilar deve suportar. Na Figura 10, é possível visualizar essa divisão das áreas de influência, garantindo que o cálculo de cargas seja feito de maneira adequada e conforme as necessidades específicas do projeto, segundo Justino, 2022.

Figura 10: Área de influência dos pilares.



Fonte: Justino, 2022.

Com base nos dados obtidos, a área dos pilares foi calculada utilizando o software Microsoft Excel®, o que permitiu uma abordagem precisa e automatizada para o cálculo dos elementos estruturais, como mostra a Tabela 10. Ainda que o cálculo do comprimento dos pilares tenha sido realizado, as mesmas dimensões propostas por Justino (2022) foram mantidas para garantir consistência no modelo estrutural. Essa decisão visa assegurar que o estudo siga os parâmetros já testados em análises anteriores, mantendo a integridade e comparabilidade dos resultados entre os diferentes modelos considerados.

Tabela 10: Dimensionamento dos pilares.

PRÉ-DIMENSIONAMENTO PILARES										
Pilares	A _{inf.} (m ²)	F _{ck} (kgf/m ²)	N ^o pav.	q _{total} (kgf/m ²)	P _i (kgf)	Área (cm ²)	Larg. (cm)	C _{comp. Calc.} (cm)	C _{comp. Adot.} (cm)	Área (cm ²)
P1	8,18	4078864	15	1223,66	150143,08	736,20	35	21	60	2100
P2	15,67	4078864	15	1223,66	287621,28	1410,30	35	40	110	3850
P3	15,67	4078864	15	1223,66	287621,28	1410,30	35	40	110	3850
P4	8,18	4078864	15	1223,66	150143,08	736,20	35	21	60	2100
P5	15,09	4078864	15	1223,66	276975,44	1358,10	35	38	110	3850
P6	27,89	4078864	15	1223,66	511918,16	2510,10	35	71	190	6650
P7	27,08	4078864	15	1223,66	497050,69	2437,20	35	69	190	6650
P8	14,5	4078864	15	1223,66	266146,05	1305,00	35	37	110	3850
P9	8,14	4078864	15	1223,66	149408,89	732,60	35	20	60	2100
P10	15,04	4078864	15	1223,66	276057,70	1353,60	35	38	110	3850
P11	15,67	4078864	15	1223,66	287621,28	1410,30	35	40	110	3850
P12	8,18	4078864	15	1223,66	150143,08	736,20	35	21	60	2100

Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

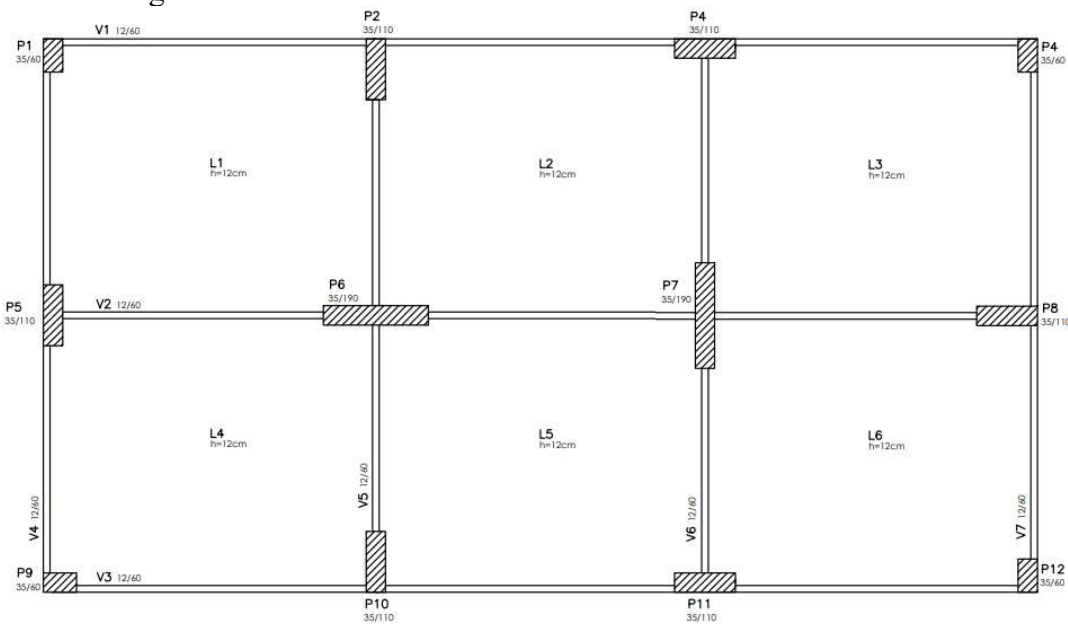
Para atender aos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023, as vigas não devem ter largura inferior a 12 cm. No exemplo hipotético, será utilizada a largura mínima permitida. A altura das vigas, por sua vez, deve estar entre 10% e 12% do comprimento do vão. Sendo o maior vão de 5,84 m (conforme mostrado na Figura 9), a altura recomendada é calculada da seguinte forma:

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

Com base nesse valor, adotou-se 60 cm de altura para todas as vigas, de forma a garantir maior segurança estrutural. No caso das lajes, de acordo com a ABNT NBR 6118:2023, o valor mínimo estipulado é de 8 cm para lajes que não estejam em balanço. No presente exemplo, optou-se por adotar uma espessura de 12 cm, visando aumentar a resistência e a estabilidade da estrutura.

Após o processo de pré-dimensionamento, foi elaborada a planta de forma do pavimento tipo, que apresenta as dimensões e a disposição dos elementos estruturais, como vigas, pilares e lajes, em uma visão em planta baixa. Esta planta, exemplificada na Figura 11, fornece uma representação clara da organização espacial dos componentes no pavimento típico da edificação. A edificação também contará com um pé-direito de 3m.

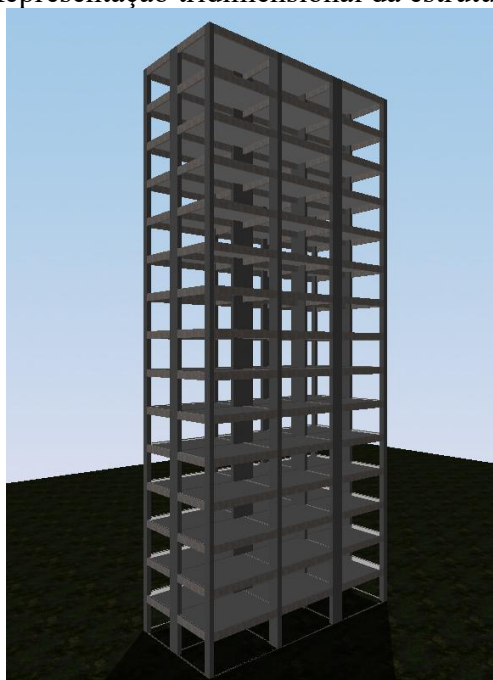
Figura 11: Planta de forma dos elementos estruturais do edifício.



Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

Para a representação esquemática da estrutura, foi utilizado o modelo tridimensional da edificação fornecido pelo software TQS 2024 (Figura 12), que é amplamente utilizado para projetos estruturais. Este programa facilitou a elaboração de um modelo espacial detalhado, permitindo uma melhor visualização de cada componente estrutural do edifício. O modelo gerado representa uma edificação com 15 pavimentos, utilizado neste trabalho, o que possibilita uma análise eficaz da disposição e interação entre os elementos, como vigas, pilares e lajes.

Figura 12: Representação tridimensional da estrutura hipotética.



Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

O cálculo do peso próprio de cada pavimento pode ser expresso pela seguinte equação:

$$PP_{pav} = \sum V_i \cdot \gamma_i$$

Nessa equação, V_i representa o volume de cada componente estrutural, considerando as suas dimensões e o número de unidades, enquanto γ_i é o peso específico de cada material (como concreto, argamassa e cerâmica). Após o processo de modelagem e pré-dimensionamento, as dimensões finais de pilares, vigas e lajes foram obtidas e estão organizadas na Tabela 11.

Tabela 11: 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: Autor, 2024.

Além disso, foram incorporados parâmetros sísmicos estabelecidos pela ABNT NBR 15421:2023, como a classificação do terreno, definida como classe B, e a categoria sísmica do edifício, em função da zona sísmica da edificação, Zona 1, onde se localiza a Cidade de Pau dos Ferros-RN, na Figura 6.

A análise sísmica incluiu tanto o método das FHE quanto o método espectral, permitindo uma comparação dos resultados em termos de deslocamentos, esforços internos e tensões. Essas metodologias visam investigar o comportamento dinâmico da estrutura frente aos sismos, conforme especificado pela norma vigente.

4.2.3. Análise sísmica pelo método das forças horizontais equivalentes (FHE)

O cálculo das forças horizontais sísmicas F_x , aplicadas em cada nível da edificação, foi automatizado em uma planilha no Microsoft Excel®, como mostra a Tabela 12. Dessa forma, a planilha permite o cálculo eficiente das forças, garantindo precisão nos resultados e facilitando a simulação pelo método das FHE proposta neste trabalho.

Essa abordagem é uma estratégia eficiente, pois combina a precisão de cálculos automatizados com a flexibilidade da modelagem no TQS, permitindo uma análise detalhada e adaptada às condições específicas da estrutura.

Tabela 12: Cálculo das forças horizontais

Nº do Pavimento	W_i (kN)	h_i (m)	$W_i \cdot (h_i)$ (kN.m)	C_{vx} (adimen.)	F_x (tf)
0	183,86	0	0	0	0
1	183,86	3	920,87	0,00	0,21
2	183,86	6	2544,93	0,01	0,59
3	183,86	9	4612,35	0,01	1,08
4	183,86	12	7033,17	0,02	1,64
5	183,86	15	9756,06	0,03	2,28
6	183,86	18	12746,70	0,04	2,98
7	183,86	21	15980,08	0,05	3,73
8	183,86	24	19436,90	0,06	4,54
9	183,86	27	23101,74	0,07	5,39
10	183,86	30	26961,90	0,08	6,29
11	183,86	33	31006,66	0,10	7,24
12	183,86	36	35226,85	0,11	8,22
13	183,86	39	39614,50	0,12	9,25

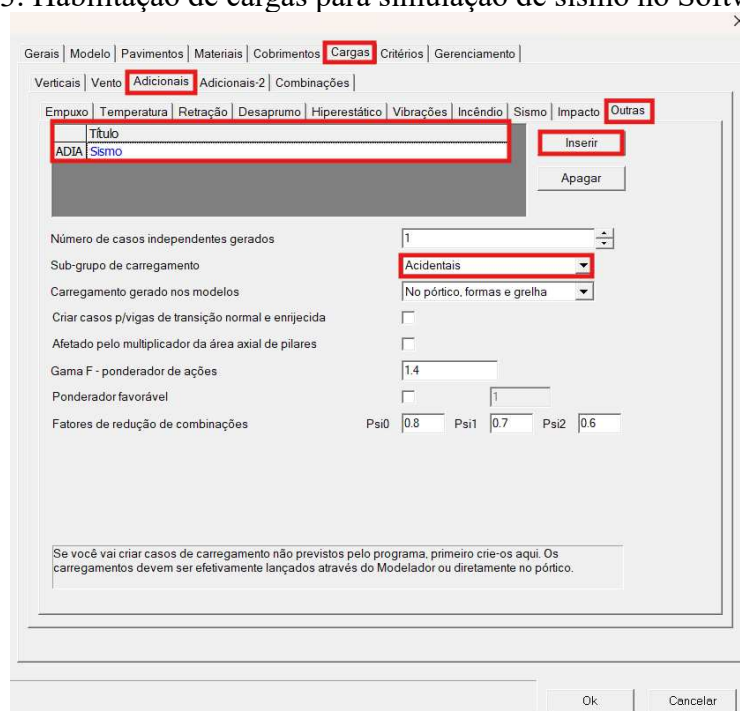
14	183,86	42	44162,61	0,14	10,31
15	183,86	45	48864,93	0,15	11,41

Fonte: Adaptado de Justino, 2022.

Após a obtenção dos resultados das forças horizontais sísmicas F_x em cada pavimento, o passo seguinte foi inserir essas forças no software TQS, por meio de um processo manual. Primeiro, foi abrir a ferramenta de edição do edifício dentro do programa. Na sequência, navega-se até a barra de ferramentas onde estão localizadas as opções de "Cargas". No menu "Cargas adicionais", seleciona-se a aba "Outras" e, a partir daí, utilizou-se a função "Inserir".

Neste ponto, foi incluída as forças sísmicas no subgrupo de carregamento correspondente a “acidentais”, e essa opção se deu por conta da natureza do sismo. Após selecionar esse subgrupo, nomeou-se o carregamento para identificação de “ADIA” e utilizou-se título da carga de “Sismo”, mostrado na Figura 13. Uma vez que o título foi inserido, a carga se torna habilitada para ser utilizada nas análises subsequentes do modelo estrutural, como mostra. Esse procedimento garante que as forças horizontais sísmicas sejam aplicadas manualmente na estrutura.

Figura 13: Habilitação de cargas para simulação de sismo no Software TQS.



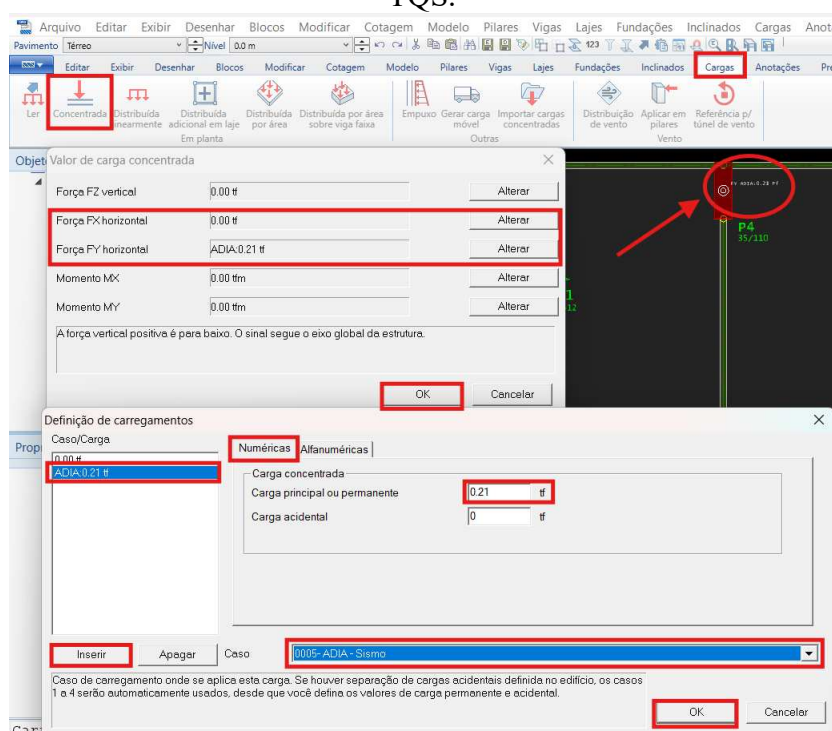
Fonte: Autor, 2024.

Após realizar o cálculo das forças horizontais sísmicas, o próximo passo foi inseri-las no modelador estrutural do software TQS. Para isso, acessou-se a aba "Cargas" no software e

selecionou-se o tipo de carga como "Concentrada". Dentro da janela de definição de cargas, o usuário deve clicar em "Alterar" tanto para a "Força FX horizontal" ou para a "Força FY horizontal". Isso abrirá uma nova janela intitulada "Definição de Carregamentos", onde, na aba "Numéricas", escolhe-se o tipo de carga apropriada.

Neste caso, optou-se por definir a carga como "Principal ou Permanente". O passo seguinte consiste em selecionar o caso de carga "ADIA-Sismo", que corresponde à ação sísmica. Após clicar em "Inserir" e confirmar com um "OK", a carga sísmica horizontal estará habilitada e pronta para ser aplicada no modelo estrutural. Esse procedimento viabiliza a simulação do comportamento da estrutura frente às forças horizontais equivalentes, conforme estipulado pela norma sísmica. A Figura 14 ilustra melhor os caminhos percorridos no processo acima descrito. Após isso, processa-se o modelo estrutural para obtenção dos esforços para a análise estrutural.

Figura 14: Adicionando cargas pontuais que simulam as forças horizontais equivalentes no TQS.



Fonte: Autor, 2024.

Vale destacar que, de acordo com a norma NBR 15421:2023, a análise de cada elemento referente ao sistema sismo resistente deve considerar a aplicação das forças sísmicas na direção que gera o efeito mais crítico no elemento analisado. Ou seja, a direção das forças horizontais deve ser aquela que maximiza as solicitações em termos de esforços e deformações, garantindo uma avaliação mais precisa da segurança estrutural.

Além disso, a norma permite que as forças sísmicas sejam aplicadas separadamente em cada uma das direções horizontais ortogonais, sem a necessidade de superposição dos efeitos em duas direções simultaneamente. Isso simplifica o processo de análise, tornando viável a aplicação das forças em uma única direção por vez, sem comprometer a segurança estrutural.

No contexto da simulação das forças horizontais equivalentes no software TQS, é muito importante verificar a direção que produz o efeito mais crítico. Para isso, o modelo estrutural deve ser analisado tanto para a direção F_X quanto para a direção F_Y , identificando em qual delas os elementos da estrutura são mais solicitados. Essa verificação tem a finalidade de assegurar que o método FHE seja corretamente aplicado, conforme os critérios estabelecidos pela norma, garantindo que a estrutura seja dimensionada de maneira adequada frente às forças sísmicas.

4.2.4. Análise sísmica pelo método espectral (AEM)

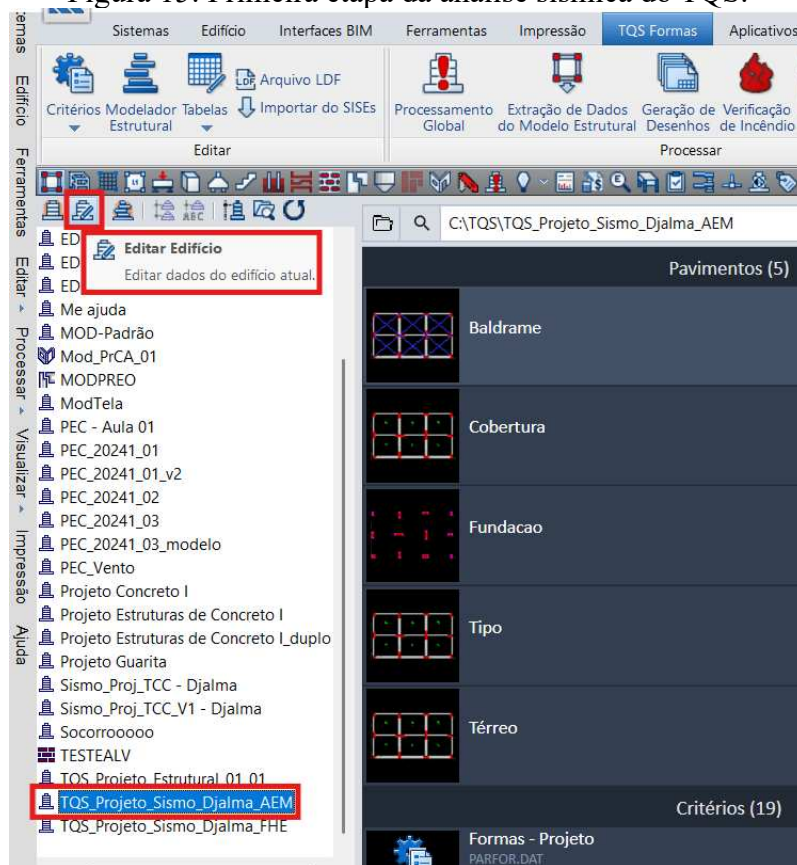
A primeira etapa de uma análise dinâmica envolve o cálculo dos períodos ou frequências naturais e dos modos de vibração, processo comumente denominada “análise modal”. Essa etapa permite identificar as características dinâmicas da estrutura, como a forma e a frequência com que ela tende a vibrar sob excitação (Nóbrega *et al.*, 2023).

De acordo com Nóbrega *et al.* (2023), a realização de uma análise espectral é possível apenas com o auxílio de programas computacionais que dispõem de um módulo específico para tal finalidade. Esses softwares são capazes de processar grandes volumes de dados e aplicar métodos avançados de cálculo, permitindo a obtenção precisa das respostas estruturais frente a excitações dinâmicas, como sismos, em diferentes frequências.

No TQS, a análise sísmica é realizada através da AEM, um método avançado que representa os efeitos do sismo na estrutura por meio de espectros de resposta aplicados ao longo de três eixos ortogonais. Esses espectros são utilizados para estimar os valores máximos esperados das respostas estruturais, oferecendo uma avaliação estatística robusta dos efeitos sísmicos.

Sendo assim, para iniciar a inclusão das cargas sísmicas, acessou-se o edifício através da árvore de projetos, localizada à esquerda da interface, onde estão organizadas todas as modelagens realizadas no software. Em seguida, foi selecionado o projeto intitulado "TQS_Projeto_Sismo_Djalma_AEM", abrindo-se a aba "Edifício" no Gerenciador TQS para começar a configuração da análise sísmica, como mostrado na Figura 15.

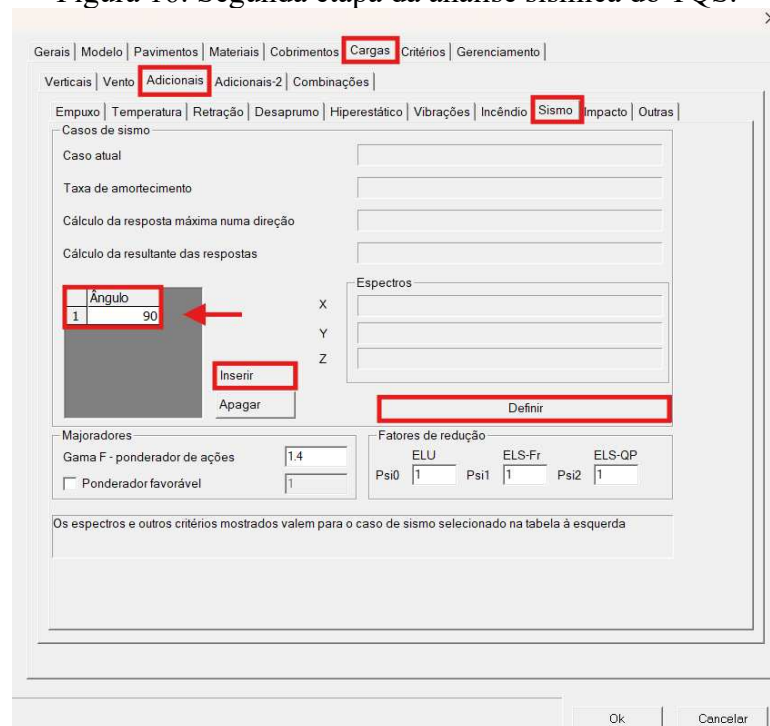
Figura 15: Primeira etapa da análise sísmica do TQS.



Fonte: Autor, 2024.

Após essa etapa, clicou-se no botão "Editar" para acessar a janela de modificação dos parâmetros estruturais do edifício. Nesse ambiente, ajustaram-se os dados necessários para a análise sísmica, preparando o modelo para a simulação. Em seguida, acessou-se a aba "Cargas" e, logo depois, foi selecionada a guia "Acidentais". Após esse procedimento, foi escolhido a natureza do carregamento na opção "Sismo", que define o tipo de força a ser aplicada na simulação (Figura 16). Nessa fase, foram inseridos os parâmetros requeridos para inserir as cargas da análise sísmica, tais como ângulo de direção das cargas, espectro de respostas, e a norma a ser utilizada, juntamente com a zona sísmica, a direção de atuação do sismo na estrutura e a classe do terreno. Ao clicar na opção "Inserir", a carga foi habilitada, permitindo a definição dos coeficientes e ajustes específicos necessários para que os cálculos fossem realizados. Então foi selecionada a opção "Definir", para seguir com o procedimento.

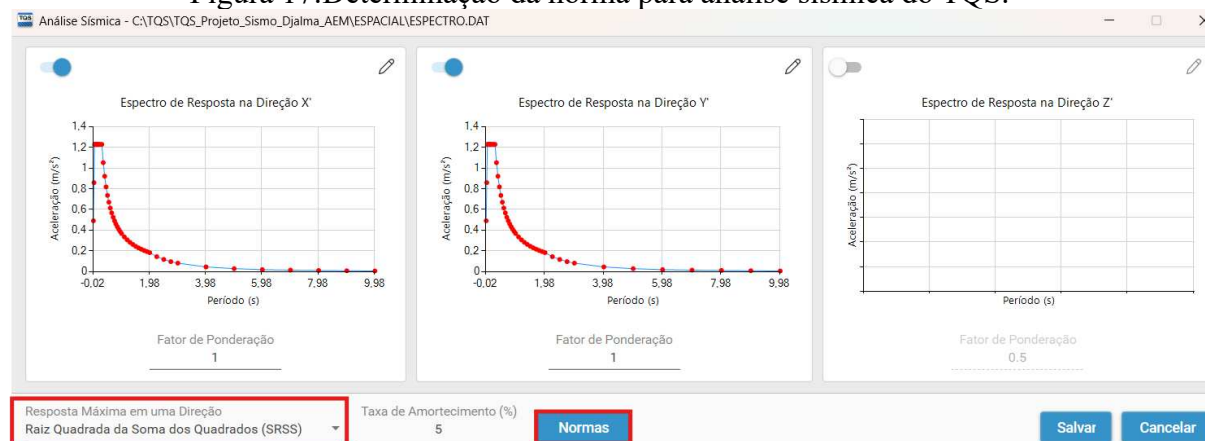
Figura 16: Segunda etapa da análise sísmica do TQS.



Fonte: Autor, 2024.

Em seguida, abriu-se uma janela para de terminar de juntar as “Respostas Máximas em uma Direção” e em “Normas” as diretrizes que determinaram a análise a ser seguida, mostrado na Figura 17.

Figura 17: Determinação da norma para análise sísmica do TQS.



Fonte: Autor, 2024.

Após isso, uma nova janela foi aberta, onde a norma ABNT NBR 15421:2023 foi selecionada, uma vez em que existem outras normas que podem ser utilizadas, para que a análise sísmica siga as recomendações orientadas pela norma brasileira. A próxima etapa, foi adotar a Zona Sísmica 1, que se refere a áreas de menor atividade sísmica no Brasil, e definir

as direções X e Y para a aplicação das forças sísmicas ao longo das duas direções ortogonais da estrutura. Na sequência, foi escolhida a Classe do Terreno B, que caracteriza as condições geológicas do solo, que influencia a propagação das ondas sísmicas e os esforços resultantes sobre o edifício. Após a definição desses parâmetros, clicou-se em "Salvar" (Figura 18), concluindo assim a configuração dos parâmetros para realizar a análise sísmica de acordo com a norma vigente.

Figura 18: Definição dos coeficientes para análise sísmica do TQS.

Normas

Norma
Brasil - NBR 15421-2023

Zona Sísmica

Direção

☒ Direção x ☒ Direção y ☐ Direção z

Parâmetros do Terreno

Classe do Terreno
B

Fator Ca 1 Fator Cv 1

Parâmetros Globais

Taxa de Amortecimento (%)
5

Salvar Cancelar

Fonte: Autor, 2024.

Ao final do processo de configuração, todos os parâmetros necessários para a análise sísmica foram devidamente determinados, conforme os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 15421:2023. Com os dados inseridos, a carga sísmica foi aplicada nas direções X e Y, considerando a zona sísmica e a classe do terreno escolhidas previamente. Para encerrar o procedimento, clicou-se no botão "OK", como mostrado na Figura 19, finalizando assim o procedimento de entrada das cargas e a preparação da estrutura para a simulação sísmica no software TQS.

Figura 19: Etapa final para inserir os coeficientes da análise sísmica do TQS.

Gerais | Modelo | Pavimentos | Materiais | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento |

Vericais | Vento | Adicionais | Adicionais-2 | Combinações |

Empuxo | Temperatura | Retração | Desaprumo | Hiperestático | Vibrações | Incêndio | Sismo | Impacto | Outras |

Casos de sismo

Caso atual: 1

Taxa de amortecimento: 0.05

Cálculo da resposta máxima numa direção: (SRSS) Raiz quadrada da soma dos quadrados

Cálculo da resultante das respostas: (SRSS) Raiz quadrada da soma dos quadrados

Espectros

X: BR-Z1-TB-D500-X p=1

Y: BR-Z1-TB-D500-Y p=1

Z:

Majoradores

Gama F - ponderador de ações: 1.4

☐ Ponderador favorável: 1

Fatores de redução

ELU: 1, ELS-Fr: 1, ELS-QP: 1

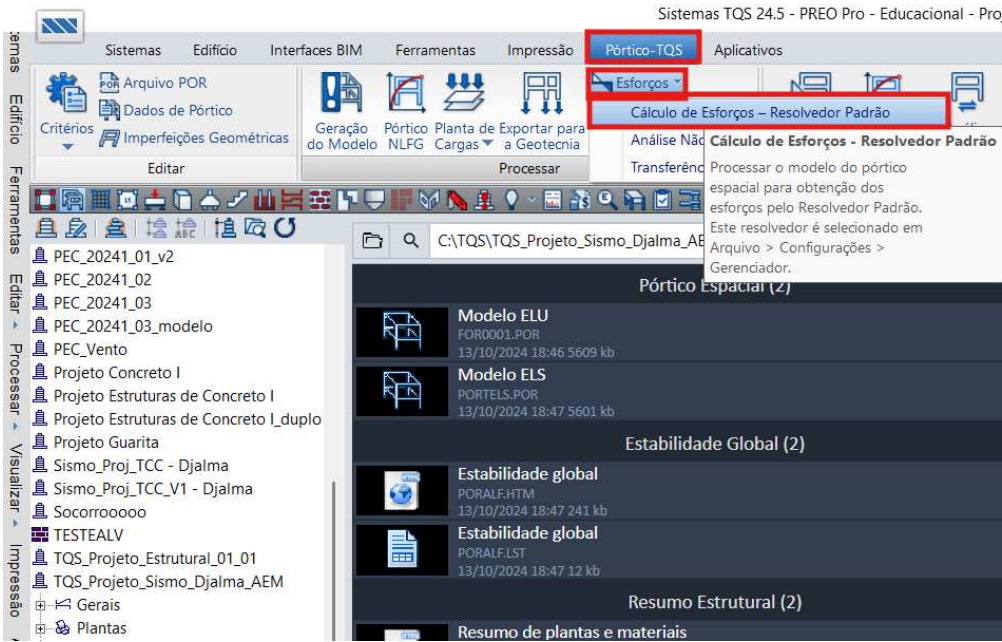
Os espectros e outros critérios mostrados valem para o caso de sismo selecionado na tabela à esquerda

Ok Cancelar

Fonte: Autor, 2024.

Por fim, processou-se o edifício para que fosse possível realizar a análise sísmica. No Gerenciador TQS, foi selecionada a aba "Sistemas", onde estão disponíveis os subsistemas para cálculos estruturais específicos. Em seguida, clicou-se no botão "Pórtico-TQS" para acessar o ambiente responsável pela análise do pórtico espacial. Dentro da aba "Pórtico-TQS", foi selecionado o botão "Processar - Esforços". Esse comando inicia o cálculo dos esforços que cada elemento estrutural irá suportar, considerando as ações sísmicas. Na sequência, foi escolhida a opção "Cálculo de esforços – Resolvedor padrão", que configura o uso do resolvedor Mix® para realizar a análise dos esforços globais do edifício com base nos dados inseridos. A figura 20 ilustra esse procedimento.

Figura 20: Processamento dos esforços para análise sísmica do TQS.



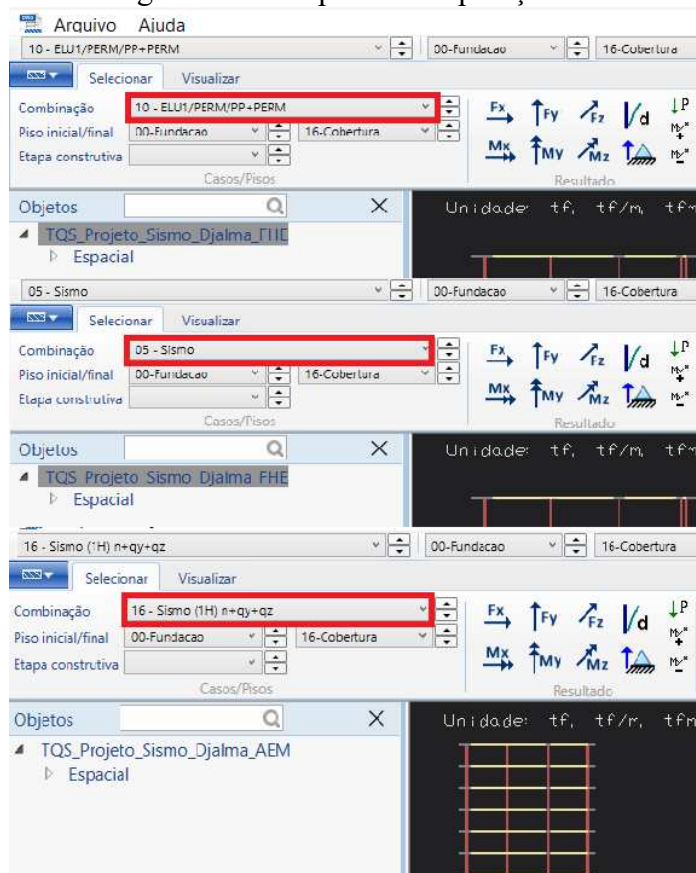
Fonte: Autor, 2024.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, será realizada uma análise dos parâmetros adotados e dos resultados obtidos, com o intuito de avaliar os efeitos provocados pelos dois métodos de resposta sísmica. Primeiramente, é fundamental examinar a estrutura sob a ação das cargas permanentes (PERM) e do peso próprio (PP), servindo como referência para os deslocamentos e esforços que surgem nas simulações sísmicas executadas no software TQS.

As simulações foram comparadas com base nos esforços gerados pela carga denominada “Sismo”, aplicada conforme o método das forças horizontais equivalentes. Já para o método da análise espectral modal, as cargas sísmicas não são aplicadas diretamente, mas obtidas por meio da combinação de modos vibracionais da estrutura, resultantes do comportamento dinâmico da edificação sob a ação de terremotos, “Sismo 1H”, como mostra a Figura 21.

Figura 21: Cargas utilizadas para a comparação dos resultados.

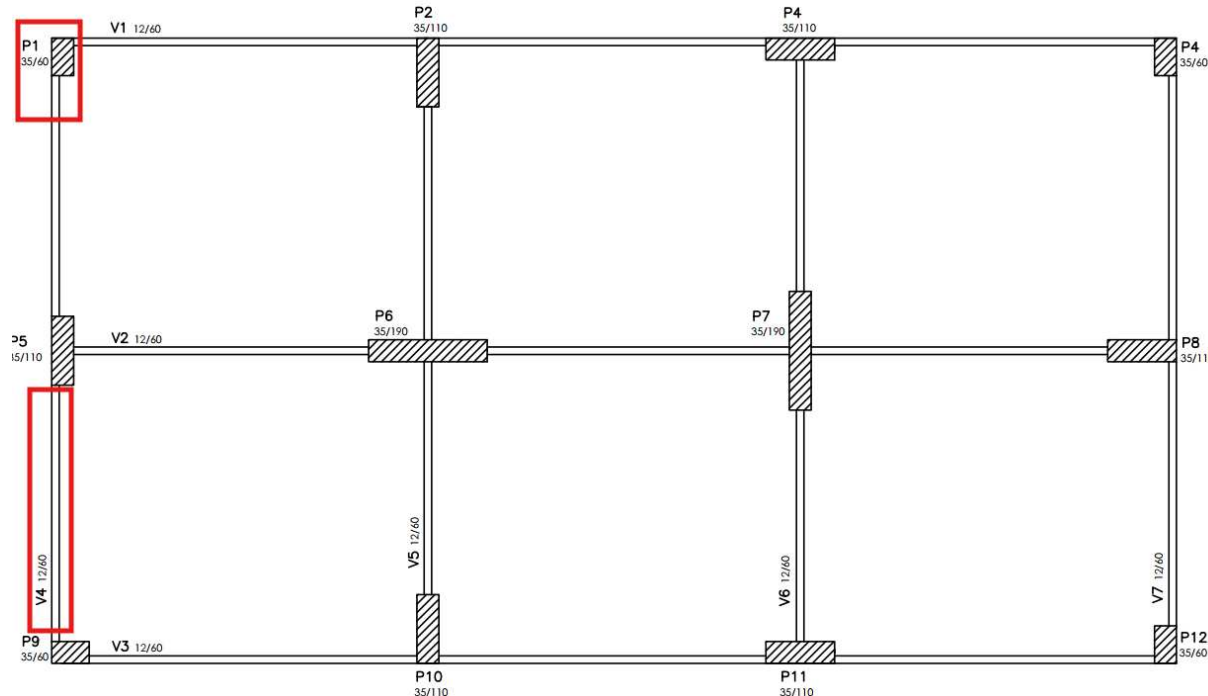


Fonte: Autor, 2024.

A análise abordará dois dos principais elementos estruturais de uma edificação: pilar e viga. Esses componentes desempenham papéis essenciais na estabilidade e resistência das construções. Os pilares são os elementos verticais que suportam as cargas da estrutura e transferem esses esforços para as fundações, enquanto as vigas, horizontais, distribuem essas cargas entre os pilares e outros elementos estruturais (Kimura, 2017).

Na análise estrutural da edificação, foi estabelecido o pilar de canto, P1 de dimensões de 35cm por 60cm e a viga V4, a largura será de 12cm e a altura 60cm, que serão mostrados a seguir na Figura 22.

Figura 22: Elementos para o estudo dos métodos HFE e AEM.



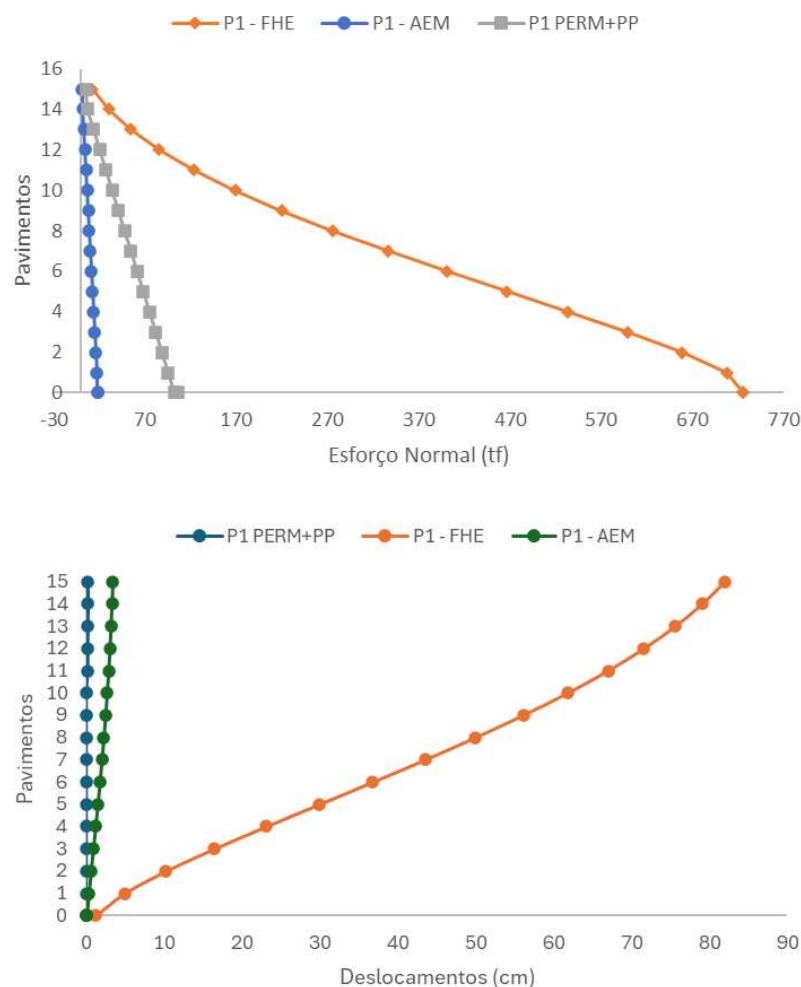
Fonte: Autor, 2024.

Essa escolha se deu devido os carregamentos em eventos sísmicos terem mais impactos nas ligações estruturais porque as forças mais elevadas são geradas nos pontos de ligação (Compraco, 2024). Portanto, para a análise dos esforços normais e dos deslocamentos horizontais o pilar P1 será analisado. Já para os deslocamentos verticais e os momentos fletores, a viga V4, que se interliga com o pilar P1. Em termos de desempenho estrutural, esses elementos estruturais possuem características que permitem um estudo representativo da distribuição de esforços provocados por eventos sísmicos em relação aos seus deslocamentos.

5.1. ANÁLISE DOS VALORES ABSOLUTOS DE ESFORÇOS NORMAIS E RELAÇÃO COM OS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS PROVOCADOS NO PILAR.

Inicialmente, é possível perceber, através da Figura 23, que os esforços normais provocados no pilar P1, tem comportamentos distintos. Na análise estatística dos esforços normais versus deslocamentos horizontais, o pilar P1 foi observado em três cenários de carregamento: o peso próprio e as cargas permanentes, as cargas de sismo pelo método das FHE e as geradas AEM. A principal diferença observada entre os métodos é a taxa de aumento da taxa de esforços normais sob as condições de carregamento sísmico do FHE, que resultou em 683% em comparação com os esforços de peso próprio e cargas permanentes. Já no AEM, verificou-se uma redução de 16% em relação a essas mesmas cargas, em termos de valores absolutos.

Figura 23: Esforços normais x deslocamentos em P1.



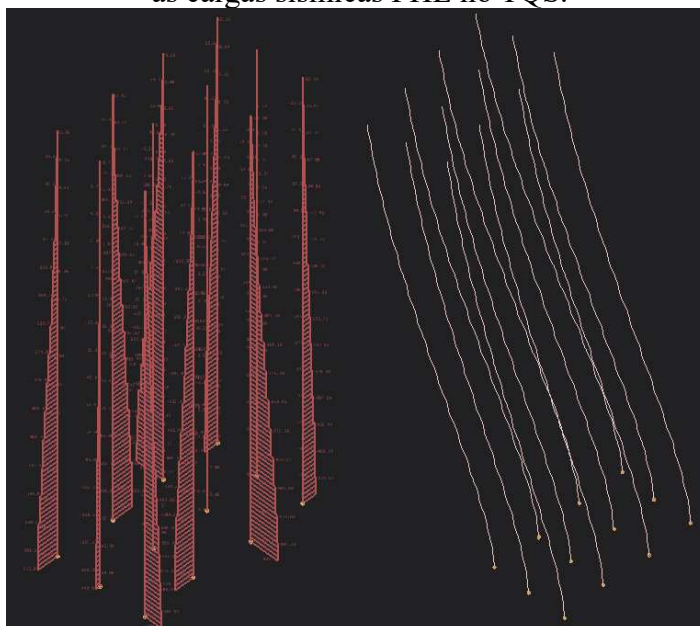
Fonte: Autor, 2024.

Na análise comparativa entre os métodos de avaliação estrutural sob cargas sísmicas, observa-se uma clara relação entre o aumento das forças sísmicas aplicadas e os deslocamentos horizontais resultantes. Essa correlação decorre da maneira como cada método distribui e transfere essas cargas para a edificação. O método de FHE adota uma abordagem conservadora, que resulta em uma aplicação maior de forças sísmicas. Como consequência, é perceptível verificar que a estrutura é submetida a maiores cargas, que amplificam as tensões internas e gera deslocamentos horizontais mais altos.

Por outro lado, o método AEM oferece uma modelagem mais precisa e condizente com os efeitos reais de um evento sísmico, como vista no exemplo do pilar. Esse método leva em consideração a complexidade dinâmica da estrutura, representando de forma mais fiel a interação entre as cargas sísmicas e os elementos estruturais. Assim, a edificação responde de maneira mais realista aos efeitos do terremoto, resultando em uma avaliação mais detalhada dos deslocamentos e deformações.

Os resultados indicam que, embora o FHE forneça margens de segurança consideráveis, pode levar a um dimensionamento excessivo da estrutura, enquanto o AEM, ao aproximar-se melhor das condições reais, pode proporcionar um equilíbrio entre segurança e eficiência estrutural. A Figura 24, mostra um recorte de como os dados dos esforços normais e deslocamentos são obtidos no TQS. Após a obtenção dos resultados, foram coletados os resultados de cada pavimento e inserido numa planilha para melhorar a visualização dos dados.

Figura 24: Gráficos dos esforços normais e dos deslocamentos obtidos na análise sísmica para as cargas sísmicas FHE no TQS.



Fonte: Autor, 2024.

5.2. ANÁLISE DOS VALORES ABSOLUTOS DE MOMENTOS FLETORES E RELAÇÃO COM OS DESLOCAMENTOS VERTICAIS PROVOCADOS NA VIGA.

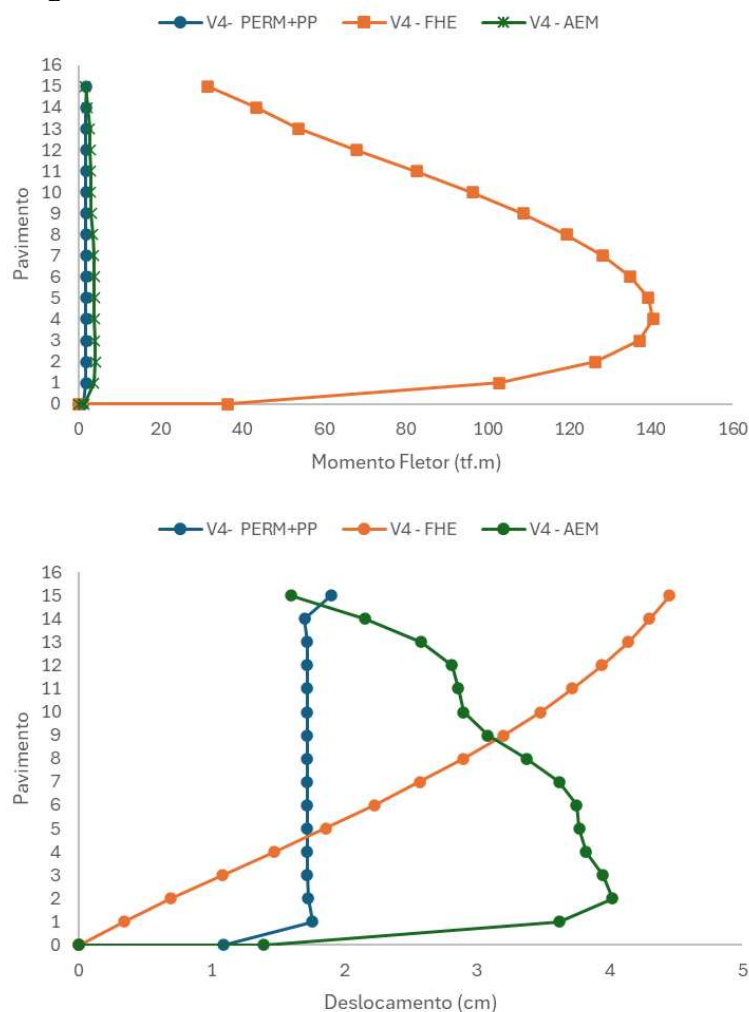
Na análise dos momentos fletores versus deslocamentos verticais, foi selecionada a viga V4 como amostra, seguindo a mesma abordagem aplicada ao pilar P1. A viga também foi analisada em três cenários de carregamento: peso próprio e cargas permanentes, cargas sísmicas pelo método FHE e pelo AEM, como será visto mais adiante na Figura 25.

A principal diferença entre os métodos de análise sísmica foi observada no aumento dos momentos fletores sob as cargas sísmicas do método FHE. Nessa condição de carregamento, os momentos fletores na viga V4 aumentaram em 1650% em relação aos momentos causados pelo peso próprio e pelas cargas permanentes. Isso mostra que o método FHE, pode gerar deslocamentos verticais ainda maiores à medida em que se aumenta as forças sísmicas nessas condições. Esse aumento expressivo indica que o método FHE, por ser conservador, ele realmente superestima os esforços nas vigas, o que sugere um dimensionamento mais robusto.

Já no método AEM, verificou-se o aumento no momento fletor de 212% em comparação aos momentos de peso próprio e cargas permanentes. Sob essas condições, é possível dizer que os deslocamentos gerados são menores quando comparados com o FHE. Essa redução mostra que o AEM, por ser um método mais refinado, fornece resultados mais próximos da realidade dos esforços dinâmicos a que a estrutura estaria submetida em situações de sismos, resultando em um comportamento estrutural mais adequado e um dimensionamento mais preciso das vigas.

As diferenças observadas indicam que a escolha do método de análise impacta diretamente no dimensionamento das vigas e no comportamento global da estrutura diante de cargas sísmicas.

Figura 25: Momentos Fletores x deslocamentos em V4.



Fonte: Autor, 2024.

Segundo Nóbrega *et. al* (2023), na engenharia estrutural, os pilares e as vigas, quando dimensionados apenas com base nas ações gravitacionais, muitas vezes precisam ser redimensionados quando submetidos às ações sísmicas. Isso ocorre porque as forças sísmicas exigem maior resistência e rigidez da estrutura, principalmente em edifícios altos ou localizados em zonas sísmicas mais severas. Quando calculadas tanto pelo método das forças horizontais equivalentes quanto pela análise do espectro modal, essas forças podem resultar em acréscimos de esforços, sobretudo nos elementos estruturais como os pilares.

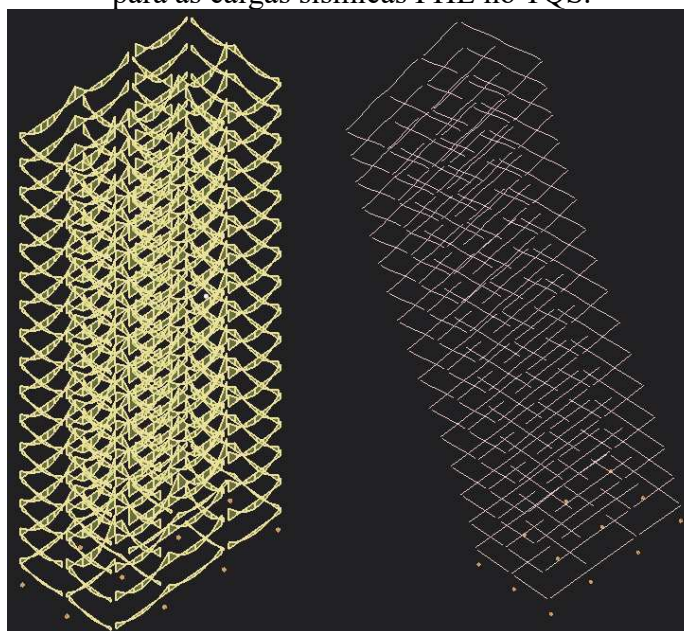
No exemplo de cálculo em questão, observa-se essa necessidade. Apesar de os elementos estruturais estarem dimensionados para suportar as cargas gravitacionais, a adição das ações sísmicas pode exigir ajustes nas seções transversais desses componentes para garantir segurança e conformidade com as normas, uma vez em que o comportamento da edificação, sob os efeitos sísmicos gerados métodos FHE e AEM, são diferentes e como resposta podem

exigir mais robustez dos elementos estruturais para projetos estruturais desenvolvidos pelo FHE e mais precisão no método AEM, com os elementos estruturais mais otimizados.

De todo modo essa revisão, geralmente, implica no aumento das dimensões das seções ou até na mudança de alguns parâmetros do projeto, como a disposição dos reforços de armadura, a depender do cenário a ser avaliado e o método utilizado para projetos resistentes a sismos.

A Figura 26, mostra um recorte de como os dados dos momentos fletores e deslocamentos são obtidos no TQS. É importante frisar que, após a obtenção dos resultados, foram coletados os resultados de cada pavimento e inserido numa planilha para melhor visualização dos dados. É importante destacar que, após a obtenção dos resultados, os dados de cada pavimento foram organizados em uma planilha para facilitar a visualização e análise das informações. Essa estruturação permite uma interpretação mais precisa, além de oferecer uma visão clara das variações de parâmetros entre os pavimentos, o que contribui para identificar padrões e otimizar a avaliação estrutural.

Figura 26: Gráficos dos momentos fletores e dos deslocamentos obtidos na análise sísmica para as cargas sísmicas FHE no TQS.



Fonte: Autor, 2024.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se considerar os efeitos sísmicos, tanto pelo método das forças horizontais equivalentes (FHE) quanto pela análise modal espectral (AME), os resultados indicam mudanças no comportamento da estrutura para os esforços normais, momentos fletores e deslocamentos horizontais e verticais.

O AME, por fornecer uma análise mais refinada das frequências naturais e dos modos de vibração da estrutura, apresentou deslocamentos horizontais menores, mas ainda assim ressaltou a importância de uma análise dinâmica completa.

O AME mostra-se uma ferramenta importante para capturar de forma precisa os efeitos dinâmicos dos sismos, que podem aumentar os momentos fletores em até 212% em relação as condições de carregamento de peso próprio e ações acidentais, gerando deslocamentos verticais menores para vigas. Que esforços normais foram 16% inferiores em relação as condições de carregamento de peso próprio e ações acidentais, provocando deslocamentos horizontais menores.

O FHE foi constatado o aumento dos esforços normais em 1650% em relação as condições de carregamento de peso próprio e ações acidentais, gerando deslocamentos verticais maiores que no método AEM. Pode aumentar os esforços normais em 683% em relação as condições de carregamento de peso próprio e ações acidentais, provocando deslocamentos horizontais menores.

Os deslocamentos horizontais e verticais verificados no método FHE foram maiores em relação à AME, sugerindo que esse método pode resultar em um dimensionamento mais conservador.

Com base nos resultados obtidos por este estudo, pode-se concluir que o comportamento estrutural dos pilares e das vigas sob as diferentes condições de carregamento estudado, peso próprio, cargas permanentes e efeitos sísmicos, revela variações importantes tanto nos deslocamentos horizontais e verticais quanto nos esforços normais e momentos fletores.

Essas conclusões destacam a importância de uma análise criteriosa ao se dimensionar estruturas em regiões sujeitas a abalos sísmicos, uma vez que os métodos empregados podem influenciar diretamente o desempenho e a segurança da edificação.

➤ **Sugestões para novos trabalhos**

Futuras investigações podem incluir a utilização de outras geometrias para comparar os efeitos do sismo pelo FHE e AEM, assim como pode ser acrescentado a análise não-linear, que permitiria uma compreensão mais aprofundada do comportamento estrutural em condições extremas. Além disso, o estudo do impacto das interações solo-estrutura em edificações localizadas em regiões de alta sismicidade pode contribuir para o entender-se melhor o comportamento dos deslocamentos horizontais e verticais e esforços das estruturas em situações adversas, bem como incluir mais elementos estruturais da edificação para se fazer uma análise completa do seu comportamento frente a eventos sísmicos.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15421**: Projeto de estruturas resistentes a sismos. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

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

CARDOSO, Alexandra; FARIA, Joana; RIBEIRO, Tiago; PINHEIRO, Ana; VASCONCELOS, Clara. ENSINAR E APRENDER EM UNIVERSIDADES SENIORES: CONCEÇÕES SOBRE A ESTRUTURA DA TERRA. **Educação em Ciências em Múltiplos Contextos**: Atas do XVII Encontro Nacional de Educação em Ciências, XVII ENEC, I Seminário Internacional de Educação em Ciências, I SIEC, Viana do Castelo, v. 15, p. 219-228, fev. 2018.

COMPRACO. **DETALHAMENTO SÍSMICO DE VIGAS E PILARES**. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/construcao-civil/detalhamento-sismico-de-vigas-e-pilares>. Acesso em: 21 out. 2024.

DEFILTRO, Vinicius Favaretto. **DIMENSIONAMENTO DE UM EDIFÍCIO SISMO RESISTENTE**. 2018. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

DIAS, António Guerner; FREITAS, Maria Conceição; GUEDES, Florisa; BASTOS, Maria Cristina. Colisão de placas. **Revista de Ciência Elementar**, Porto, v. 2, n. 1, 2014.
DUARTE, João. C. Reativação tectónica, **Revista de Ciência Elementar**, v. 7, n. 2, 30 jun. 2019.

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.

HILDENBRAND, Jorge Dagoberto. Tremores de Terra e o Novo Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil. **Anais da 69ª Reunião Anual da Sbpcc**, Belo Horizonte, p. 3, jul. 2017.

JUSTINO, Lucas Queiroz. **ESTRUTURAS SUBMETIDAS A SISMOS: INFLUÊNCIA DO SOLO E QUANTIDADE DE PAVIMENTOS NO MÉTODO DAS FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES**. 2022. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022.

KIMURA, Alio. **INFORMÁTICA APLICADA A ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. 2. ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

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.

NASCIMENTO, Fernanda Alanna Alves do. **ESTRUTURAS SUBMETIDAS A SISMOS: ANÁLISE PELO MÉTODO DAS FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES**. 2014. 77 f. Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2014.

NÓBREGA, Selma H. S. da *et al.* Aplicação dos critérios e métodos da NBR 15421:2023 – Projeto de estruturas resistentes a sismos. **REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES (IBRACON): NORMAS TÉCNICAS: PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO À LUZ DAS NORMAS RECÉM-REVISADAS**, São Paulo, v. 111, p. 14-19, 2023. Trimestral. Disponível em: <https://concreteconstrucoes.org.br/index.php/revista/edicao-111>. Acesso em: 27 set. 2023.

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. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/364337623>. Acesso em: 23 set. 2024.

PARISENTI, Ronaldo. **ESTUDO DE ANÁLISE DINÂMICA E MÉTODOS DA NBR 15421 PARA PROJETO DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS A SISMOS**. 2011. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PEREIRA, Naia Guimarães. **ANÁLISE DO POSICIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE SISMOGRAFIA EM CAVIDADES NATURAIS SUBTERRÂNEAS**. 2018. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

RSBR, Rede Sismográfica Brasileira. **Boletim Sísmico Brasileiro**. 2023. Disponível em: <http://rsbr.on.br/pevjs/index.html>. Acesso em: 02 out. 2024.

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.

TOLEDO, Maria Cristina Motta de. **ESTRUTURA INTERNA DA TERRA**. In: USP (org.). Licenciatura em Ciências: Geologia Módulo 2. São Paulo: Usp, -. Cap. 3. p. 44-68. 2022.

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**. São Paulo: Cengage Learning, 2017. 464 p.