

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS

GERAIS - *CAMPUS BETIM*

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Júlia Stephanie Costa Corrêa

**O IMPACTO PROVOCADO POR ABALO SÍSMICO EM ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Betim

2023

JÚLIA STEPHANIE COSTA CORRÊA

**O IMPACTO PROVOCADO POR ABALO SÍSMICO EM ESTRUTURAS
METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Evanilton José Alves Barbosa

BETIM
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

C824i Corrêa, Júlia Stephanie Costa
O impacto provocado por abalo sísmico em estruturas metálicas /
Júlia Stephanie Costa Corrêa. – 2023.

57 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Minas Gerais, Câmpus Betim, 2023.

Orientador: Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa

1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Abalo sísmico. 3. Estruturas
metálicas. 4. Engenharia mecânica. I. Corrêa, Júlia Stephanie Costa.
II. Título.

CDU: 624

Júlia Stephanie Costa Corrêa

O IMPACTO PROVOCADO POR ABALO SÍSMICO EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 06/12/2023 pela banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
EVANILTON JOSE ALVES BARBOSA
Data: 22/02/2024 17:59:17-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa (Orientador)



Documento assinado digitalmente
NORIMAR DE MELO VERTICCHIO
Data: 26/02/2024 14:46:45-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

:hio

Prof. Dr. Wanderson de Oliveira Leite

Dedico aos meus amados pais, Sebastião e Delma, maiores incentivadores e fontes inesgotáveis de apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de fazer minha primeira graduação, agradeço aos meus pais por ter me ajudado ter me dado todo apoio para chegar até aqui, agradeço meus familiares e a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente.

“É muito mais fácil corromper do que persuadir.”

Sócrates

RESUMO

Este estudo abrange os impactos ocasionados pela sismicidade em estruturas metálicas. Com isso, objetivou-se estudar estruturas metálicas sismo-resistentes e analisar os impactos estruturais provocados por abalos sísmicos nas mesmas. Justificou-se a seleção temática pela necessidade de se obter o entendimento do impacto das forças geradas por abalos sísmicos, demonstrando a importância desta abordagem para o desenvolvimento da análise estrutural dos equipamentos que serão instalados nesses locais. Metodologicamente, incorporou-se uma revisão bibliográfica documental e exploratória em harmonia com uma pesquisa de natureza qualitativa e observacional. Desta forma, averiguou-se que embora a frequência de terremotos de grande magnitude seja inferior no Brasil em comparação com regiões altamente sísmicas, a possibilidade de eventos sísmicos não pode ser subestimada, tornando-se imprescindível que projetistas e engenheiros incorporem a sismicidade como um elemento central ao desenvolver estruturas metálicas. Ademais, elencou-se que construções projetadas com alta ductilidade exibem uma capacidade maior de deformação controlada, resultando assim na minimização dos danos em situações de terremotos e, de forma crucial, na melhoria da segurança das pessoas que as ocupam.

Palavras-Chave: Abalo Sísmico. Estruturas Metálicas. Normas. Sismicidade.

ABSTRACT

This study covers the impacts caused by seismicity on metallic structures. With this, the objective was to study earthquake-resistant metallic structures and analyze the structural impacts caused by earthquakes on them. The thematic selection was justified by the need to obtain an understanding of the impact of the forces generated by earthquakes, demonstrating the importance of this approach for the development of the structural analysis of the equipment that will be installed in these locations. Methodologically, a documentary and exploratory bibliographic review was incorporated in harmony with qualitative and observational research. In this way, it was found that although the frequency of large magnitude earthquakes is lower in Brazil compared to highly seismic regions, the possibility of seismic events cannot be underestimated, making it essential that designers and engineers incorporate seismicity as an element central when developing metallic structures. Furthermore, it was noted that buildings designed with high ductility exhibit a greater capacity for controlled deformation, thus resulting in the minimization of damage in earthquake situations and, crucially, improving the safety of the people who occupy them.

Keywords: Seismic Shock. Metallic structures. Standards. Seismicity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Placas tectônicas no Mapa Mundi	19
Figura 2 – Limites entre as placas	20
Figura 3 – Leitura de amplitude em sismômetro.....	21
Figura 4 – Movimento e forma de propagação das ondas produzidas pela ação sísmica.....	25
Figura 5 – Boletim Sísmico Brasileiro (IAG-USP).....	28
Figura 6 – Sismicidade da América do Sul	30
Figura 7 – Sistema massa, mola e amortecedor com um grau de liberdade.....	33
Figura 8 – Sistema de um grau de liberdade.....	34
Figura 9 – Esquema representando sistema de amortecimento.....	35
Figura 10 – Sistema com vários graus de liberdade.....	37
Figura 11 – Sistema com dois graus de liberdade (pórtico).....	38
Figura 12 – Esquema proposto para análise.....	39
Figura 13 – Sistema de um grau de liberdade (pórtico).....	40
Figura 14 – Esquema de aplicação do carregamento	41
Figura 15 – Esquema de carregamento - Múltiplos pavimentos.....	41
Figura 16 – Modos de vibração natural.....	42
Figura 17 – Zoneamento da aceleração sísmica do Brasil, para terrenos da classe B (“Rocha”).....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Magnitude dos sismos.....	21
Quadro 2 – Escalas de magnitude.....	22
Quadro 3 – Escala de Mercali.....	23
Quadro 4 – Boletim Sísmico.....	27
Quadro 5 – Maiores abalos sísmicos do Brasil.....	29
Quadro 6 – Classificação de terrenos.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aceleração sísmica horizontal do solo segundo a NBR 15421 (2023)...48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	16
3. JUSTIFICATIVA.....	17
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1 Terremoto.....	18
4.2 Sismo.....	24
4.3 Sismicidade	26
4.3.1 Sismicidade no Brasil	26
5. DINÂMICA ESTRUTURAL E ANÁLISE SÍSMICA	31
5.1 Análise dinâmica	32
5.1.2 Análise dinâmica - sistema de um grau de liberdade (SGL).....	32
5.1.3 SGL Submetido a vibração livre	34
5.1.4 Amortecimento no Processo Vibratório.....	35
5.1.5 Análise Dinâmica - Sistema de Vários Graus de Liberdade	36
5.2 Análise Sísmica	39
5.2.1 Análise sísmica - sistema de um grau de liberdade.....	39
5.2.2 Análise sísmica - sistema de vários graus de liberdade.....	40
6. NBR 15421/2023.....	42
6.1 Análise sísmica pelo método espectral.....	50
6.2 Análise sísmica com históricos de acelerações no tempo	51
6.3 Análise sísmica pelo método das forças horizontais equivalentes.....	51
7. ESTUDO DAS NORMAS SISMO RESISTENTES.....	52
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

Terremoto é um termo latino *terrae motu*, que significa movimento da terra. Um terremoto é um fenômeno natural caracterizado por um forte tremor da terra causado por fatores como o choque de diferentes placas tectônicas (blocos rochosos que constituem a crosta terrestre), falhas geológicas, adaptações do solo ou atividade vulcânica. São movimentos intensos, repentinos e inevitáveis que podem ser destrutivos. A preocupação com terremotos não é nova. O terremoto que assolou a cidade de Lisboa em 1755 foi tema de debate entre filósofos como Voltaire e Rousseau. Porém, apenas no final do século XIX que as preocupações se intensificaram (VALDATI J., 2000). Sabe-se também que os abalos sísmicos são um dos fenômenos mais destrutivos da natureza, sendo que no século XX cerca de 2,7 milhões de pessoas morreram em consequência destes abalos (WICANDER, 2009). Com isso, seus impactos devem ser incluídos ao se projetar estruturas que serão instaladas em zonas sísmicas.

Acredita-se que terremotos de grande magnitude não ocorram no Brasil, considerando que cerca de 95% dos terremotos ocorrem em áreas adjacentes às placas tectônicas (WICANDER, 2009) e distantes dos limites das placas litosféricas. Porém, possui uma sismicidade que deve ser levada em consideração em projetos de construção. Dependendo da localização, tipo de estrutura e distância do epicentro do terremoto, mesmo terremotos de baixa magnitude são suficientes para causar danos (LOPES, 2017).

A maioria das estruturas são construídas sem uma análise estrutural sísmica. Ao projetar uma estrutura à prova de terremotos, a resistência e a ductilidade são fatores essenciais no desempenho das estruturas durante um terremoto (PEÑA, 2012). A importância da análise sísmica é necessária à medida que os métodos de cálculo são refinados e as estruturas tornam-se sensíveis à vibração (LOPES, 2017).

Estruturas carregadas dinamicamente, nas quais a frequência de excitação se aproxima de sua frequência natural, entram em ressonância e aumentam as amplitudes. Muitas vezes, essas cargas são responsáveis pela falha de estruturas, uma vez que os efeitos demandam mais do que a avaliação estática, na qual as amplitudes de vibração podem estar acima dos valores permitidos. O dimensionamento incorreto para cargas estáticas e dinâmicas pode levar a falhas de

segurança ou operacionais que impossibilitam o uso da estrutura. Isso encurta a vida útil (ROSSATO, 2017).

Tornou-se necessário obter um melhor entendimento da resposta sísmica de estruturas com distribuição irregular de massa, rigidez ou resistência, uma necessidade também reconhecida pelas normas para o projeto de estruturas à prova de terremotos (GASPERIN, 2014). A NBR 15421/2016 (Projetos de Estruturas Sísmicas Resistentes) especifica os requisitos para a comprovação da segurança de estruturas ameaçadas de terremotos. Como este padrão é relativamente novo e pouco utilizado em comparação com padrões internacionais de longa data, especialmente em países com forte sismicidade, é necessária uma análise comparativa dos métodos de cálculo e parâmetros de projeto (LOPES, 2017).

Portanto, através desse trabalho será possível uma melhor compreensão dos métodos de análise e considerações de projetos contidos na NBR 15421/2006. Além de propiciar o conhecimento do comportamento de estruturas metálicas sob a ação de abalos sísmicos.

2. OBJETIVO

Geral:

Este trabalho tem como objetivo geral estudar estruturas metálicas sísmo-resistentes e os impactos estruturais provocados por abalos sísmicos nas mesmas.

Específicos:

- Realizar uma revisão sobre sismologia, análise dinâmica e análise sísmica de estruturas metálicas;
- Estudar os conceitos e critérios de projeto da norma brasileira de projeto de estruturas resistentes a sismos NBR 15421:2006;

3. JUSTIFICATIVA

Atualmente trabalho como projetista mecânica em uma empresa fabricante de transformadores de potência que eventualmente são instalados em regiões que sofrem com ações sísmicas. A necessidade de se obter o entendimento do impacto das forças geradas por abalos sísmicos é de extrema importância para o desenvolvimento da análise estrutural dos equipamentos que serão instalados nesses locais. Com isso, o presente trabalho irá proporcionar um melhor entendimento, por meio de fundamentos, normas e procedimentos, que contribuirão com o desenvolvimento pessoal e servirá como base para estudos no desenvolvimento de projetos futuros.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os terremotos representam uma das forças naturais mais destrutivas, sua imprevisibilidade quanto ao local e momento de ocorrência intensifica sua devastação. Com base em registros históricos, é possível estimar variáveis cruciais, como intensidade do terremoto, localização geográfica, profundidade do foco sísmico, extensão da falha geológica envolvida, entre outras que podem influenciar a magnitude e os efeitos de um terremoto em determinada região, destacando a necessidade premente do desenvolvimento de medidas que minimizem os impactos desencadeados por esse fenômeno (LOPES, 2017).

No cenário brasileiro, a escassa atividade sísmica resultou em poucos estudos sobre estruturas à prova de terremotos. A baixa frequência de abalos sísmicos no país contribui para a negligência generalizada em relação à aplicação da norma brasileira para o projeto de estruturas sísmicas (NBR 15421: 2006). Entretanto, em nações com elevada atividade sísmica, há significativos investimentos em pesquisas voltadas para esse campo (PEÑA, 2012).

4.1 Terremoto

Os terremotos, fenômenos caracterizados por vibrações súbitas e temporárias na superfície terrestre, podem ser desencadeados por diversos fatores, como atividade vulcânica, migração de gases subterrâneos, ou movimentos de lajes rochosas. Dentre esses, os movimentos subterrâneos das placas tectônicas destacam-se como a principal fonte de preocupação do ponto de vista técnico (ALVES, 2015).

A compreensão desse fenômeno está intrinsecamente ligada à teoria da deriva continental de Alfred Wegener, que descreve a Terra como um planeta dinâmico, com a crosta terrestre fragmentada em placas em constante movimento acima do magma. A teoria das placas tectônicas, desenvolvida por Robert Palmer e Donald Mackenzie, aprimorou a compreensão desses movimentos, resultando nas zonas de divergência e convergência, ilustradas na Figura 1 (PARISENTI, 2011).

A geologia mundial desempenha um papel fundamental na ocorrência de terremotos. O planeta Terra é composto por uma crosta fragmentada em placas

tectônicas que se movem continuamente sobre o manto. Esses movimentos, decorrentes da teoria da deriva continental de Alfred Wegener, resultam em zonas de divergência e convergência. As áreas de divergência, onde as placas se afastam, possibilitam a ascensão do magma, dando origem a erupções vulcânicas. Já as zonas de convergência, onde as placas se aproximam, podem resultar em colisões ou subducção, gerando terremotos devido à liberação intensa de energia por meio de ondas sísmicas (PARISENTI, 2011).

No contexto brasileiro, a atividade sísmica é historicamente mais baixa em comparação com outras regiões do mundo. No entanto, isso não implica imunidade a terremotos. Uma compreensão detalhada da geologia local é essencial para avaliar os potenciais riscos e impactos. O Brasil possui uma diversidade geológica significativa, e a região específica onde uma empresa está situada pode apresentar características que a tornam mais ou menos propensa a eventos sísmicos.

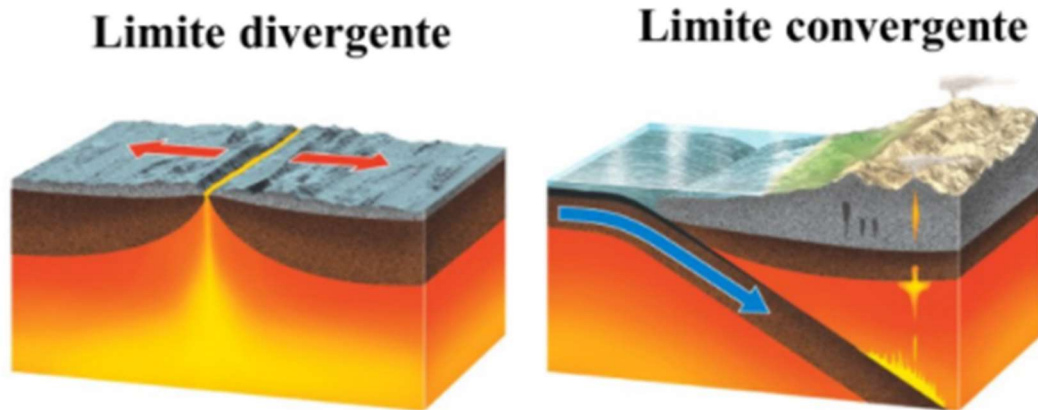
Figura 1 - Placas tectônicas no Mapa Mundi



Fonte: FRANCISCO, 2022, p.1.

Em regiões de divergência de placas, o magma emerge na superfície, caracterizando erupções vulcânicas. Já em áreas de convergência, como evidenciado na Figura 2, ocorrem colisões ou subducção, movimento em que uma placa mais densa desliza sob outra menos densa, gerando uma rápida liberação de energia na forma de ondas sísmicas, que caracterizam os terremotos (ANDREY, 2019).

Figura 2 - Limites entre as placas



Fonte: ANDREY, 2019, p. 2

O ponto onde as placas tectônicas se encontram é denominado hipocentro, localizado abaixo da superfície terrestre, enquanto seu ponto de projeção na superfície é conhecido como epicentro. As consequências dos terremotos podem ser percebidas por quilômetros, dependendo da proximidade do hipocentro à superfície e da magnitude do evento (LOPES, 2017).

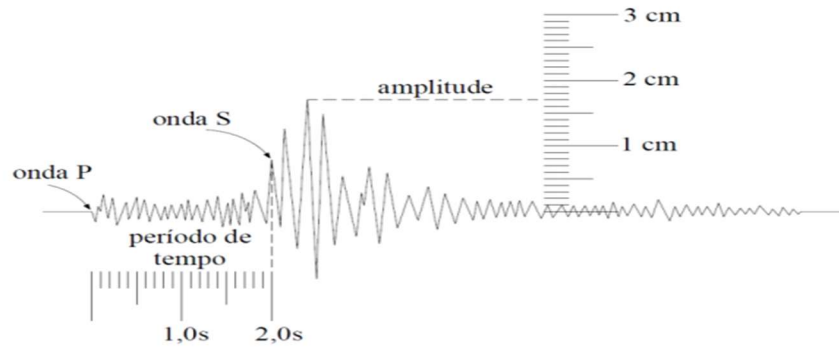
Na análise desses eventos, dois parâmetros essenciais são magnitude e intensidade. A magnitude, medida da quantidade total de energia liberada, baseia-se na amplitude das ondas sísmicas. Charles Richter e Beno Gutenberg desenvolveram a escala Richter em 1935 para comparar a energia de diferentes terremotos. Já a intensidade, que se relaciona às vibrações perceptíveis e aos danos causados, é medida pela escala de Mercalli de Giuseppe Mercalli, proposta em 1902 (PARISENTI, 2011).

A magnitude, representada pela variável M na Equação (1), é determinada pelo logaritmo à base dez da amplitude da onda sísmica, variável A , registrada pelo sismômetro (PEÑA, 2012). A escala Richter aumenta logaritmicamente, onde cada ponto de incremento implica um aumento de 10 vezes na amplitude sismográfica. Importante ressaltar que o aumento é na amplitude das ondas sismográficas, não na energia liberada (LOPES, 2017).

$$M = \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

onde A é a leitura do sismômetro e A_0 é a amplitude da onda utilizada como referência (PEÑA, 2012).

Figura 3 – Leitura de amplitude em sismômetro



Fonte: PENÃ, 2012

A escala Richter, seguindo uma progressão logarítmica, implica que cada ponto adicional representa um aumento de 10 vezes na amplitude do registro sismográfico. Nesse contexto, podemos considerar que a amplitude da onda gerada por um terremoto de magnitude 5.0 é 10 vezes maior do que a amplitude resultante de um terremoto de magnitude 4.0, como exemplificado no Quadro 1. É fundamental destacar que essa variação está relacionada à amplitude das ondas sismográficas, e não à quantidade total de energia liberada (LOPES, 2017).

Quadro 1: Magnitude dos sismos

Magnitude	Descrição
Menor que 2.0	Geralmente não percebido, mas registrado.
2.0 - 2.9	Geralmente não causa danos, mas é percebido.
3.0 - 3.9	Pode causar danos significativos a edifícios frágeis.
4.0 - 4.9	Pode causar danos moderados a estruturas bem construídas.
5.0 - 5.9	Pode causar danos consideráveis em áreas densamente povoadas.
6.0 - 6.9	Pode causar danos graves em áreas populosas.
7.0 - 7.9	Pode causar danos graves em áreas extensas.
8.0 e acima	Pode causar danos generalizados em áreas muito grandes.

Fonte: PARISENTI, 2011

Este quadro apresenta a classificação de magnitudes sísmicas e suas descrições correspondentes, oferecendo uma referência para a avaliação da intensidade e potencial impacto de terremotos.

Com a extensa distribuição de estações sismográficas globalmente, torna-se evidente que o método introduzido por Richter é aplicável em determinadas frequências e distâncias, uma vez que foi concebido para a comparação relativa entre eventos sísmicos. O Quadro 1 emerge como um recurso informativo essencial, destacando novas escalas elaboradas como uma extensão do conceito original proposto por Richter (PENÃ, 2012). Esta tabela reforça e revalida a pertinência contínua do método em cenários específicos, proporcionando uma visão aprofundada das escalas de magnitude sísmica.

Quadro 2 – Escalas de magnitude

Sigla da Escala	Nome da Escala
ML	Escala de Magnitude Local
MS	Escala de Magnitude de Sismos
mb	Magnitude de Corpo Inteiro (mb)
Mw	Magnitude de Momento (Mw)
Me	Magnitude de Energia (Me)
MI	Magnitude de Superfície Local (MI)
Mc	Magnitude de Califórnia (Mc)
Mj	Magnitude de Johnson (Mj)
Md	Magnitude de Duration (Md)

Fonte: PENÃ, 2012

O Quadro 2 destaca diversas escalas de magnitude sísmica, identificando suas siglas e nomes correspondentes. Cada escala possui características específicas para medir e descrever a magnitude de terremotos com base em diferentes parâmetros.

A intensidade de um terremoto é uma medida qualitativa dos impactos nos edifícios, estruturas, pessoas, objetos e meio ambiente. É importante destacar que, ao contrário da magnitude, que é uma característica intrínseca ao sismo, a

intensidade depende da localização e da forma específica do terremoto (PENÃ,2012)

Uma das escalas mais amplamente adotadas para classificar a intensidade é a escala de Mercalli, apresentada no Quadro 3, a qual varia de I, imperceptível, a XII, catastrófico. Esta escala foi desenvolvida em 1902 pelo sismólogo italiano Giuseppe Mercalli. Ao contrário da escala Richter, a escala de Mercalli não se baseia em registros sismográficos, mas sim nos efeitos e danos observados em estruturas e percebidos pelas pessoas nas proximidades do epicentro do tremor. É crucial ressaltar que, para um mesmo terremoto, a intensidade pode variar em diferentes localidades relatadas (LOPES, 2017).

Quadro 3: Escala de Mercalli

Grau	Descrição dos Efeitos	Aceleração (g)
I	Imperceptível	Menor que 0.001
II	Muito fraco - Perceptível apenas por pessoas em repouso.	0.001 - 0.01
III	Fraco - Perceptível por pessoas em repouso.	0.01 - 0.1
IV	Moderado - Raramente causa danos.	0.1 - 0.2
V	Um pouco forte - Pode causar danos leves	0.2 - 0.3
VI	Forte - Pode causar danos moderados em edifícios bem construídos em áreas até centenas de quilômetros do epicentro.	0.3 - 0.5
VII	Muito forte - Pode causar danos consideráveis em áreas extensas.	0.5 - 0.8
VIII	Severo - Pode causar danos graves em áreas a centenas de quilômetros do epicentro.	0.8 - 1.2
IX	Violento - Danos graves em áreas situadas a dezenas de quilômetros do epicentro.	1.2 - 1.8
X	Extremamente violento - Danos generalizados em áreas próximas ao epicentro.	1.8 - 2.5
XI	Catastrófico - Danos graves em grandes áreas.	2.5 - 3.5
XII	Cataclísmico - Danos totais, com possível alteração da topografia.	Acima de 3.5

Fonte: PARISENTI, 2011

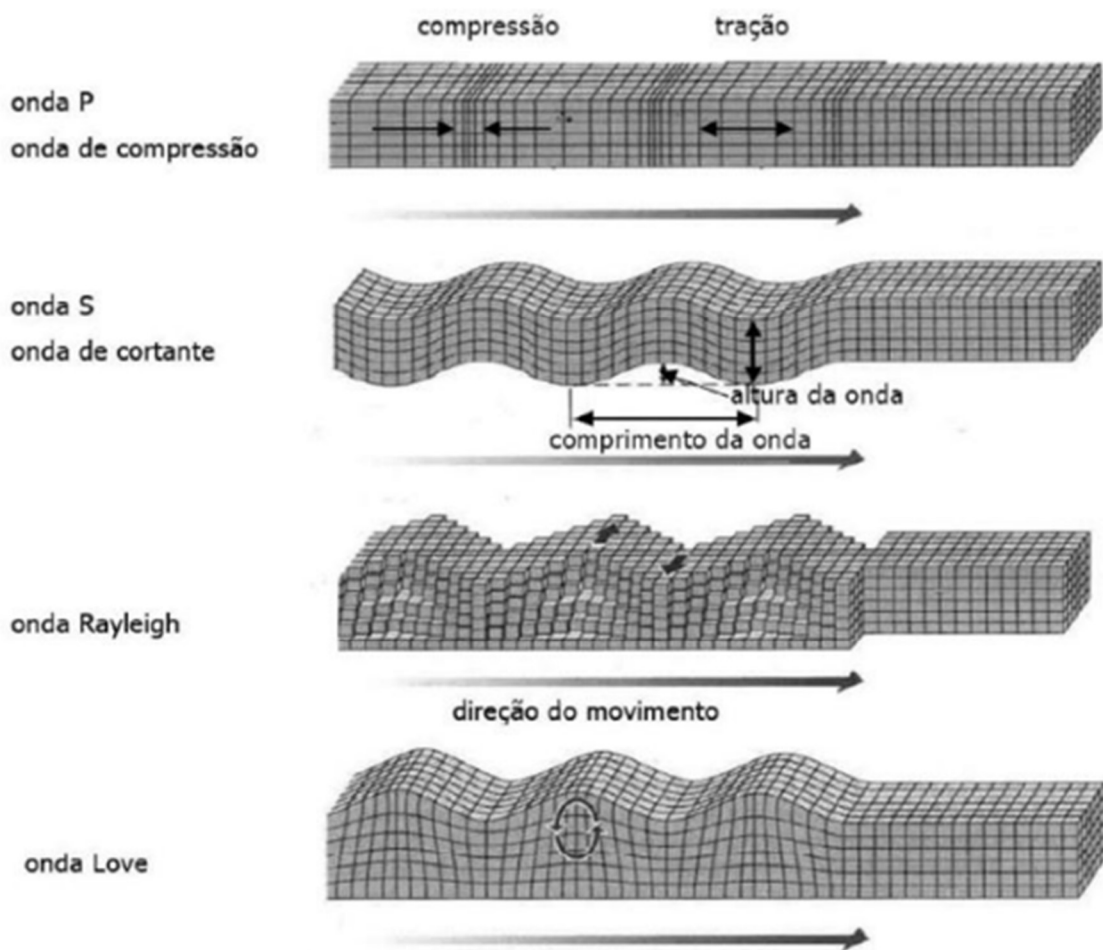
Este quadro oferece uma classificação de terremotos com base em graus de intensidade, descrição dos efeitos observados e as correspondentes acelerações sísmicas associadas.

A relação entre a taxa de destruição causada por um terremoto e o número de vítimas está mais intrinsecamente ligada ao nível de tecnologia empregado para lidar com o impacto do que à sua força intrínseca. Um exemplo ilustrativo desse cenário é o terremoto ocorrido em 2010 no Haiti, classificado com 7 graus na escala Richter, resultando em um número alarmante de mais de 200.000 mortos e extensa devastação (ALVES, 2015). Esse episódio ressalta a necessidade premente de desenvolver sistemas que minimizem as vibrações nas estruturas, visando, assim, a redução dos danos causados.

4.2 Sismo

A propagação da energia liberada durante um terremoto se manifesta através de ondas sísmicas que percorrem tanto a profundidade quanto a superfície da crosta terrestre. O fenômeno é ilustrado na Figura 4, evidenciando a existência de três tipos de ondas distintas: as ondas de compressão ou longitudinais (P - ondas primárias, ou simplesmente, ondas P), as ondas de interseção ou transversais (S - ondas secundárias, ou ondas S), e as ondas de superfície (ondas de Rayleigh, ou ondas R; ondas Love, ou ondas L) (PEÑA,2012).

Figura 4 – Movimento e forma de propagação das ondas produzidas pela ação sísmica



Fonte: PENÃ, 2012

As ondas P, ou primárias, representam um movimento oscilante no qual as partículas do material rochoso se deslocam para frente e para trás, ocasionando uma alternância entre deformação por tração e compressão. Estas ondas, conhecidas por chegar primeiro à superfície, são mais rápidas que as ondas secundárias. Já as ondas S, ou secundárias, provocam um deslocamento das partículas em uma direção perpendicular à direção de propagação, resultando em deformações por cisalhamento. À medida que a energia da onda se propaga próximo à superfície terrestre, duas outras ondas surgem: as ondas de Rayleigh e as ondas Love. As ondas Rayleigh, assemelhando-se às ondas P primárias, são caracterizadas por movimentos de tração e compressão, enquanto as ondas Love são ondas de cisalhamento. Embora possuam uma taxa de deslocamento mais

lenta, essas ondas superficiais exibem um elevado potencial destrutivo (PENÃ, 2012).

4.3 Sismicidade

A sismologia, como campo de estudo, dedica-se à análise do número e da intensidade dos terremotos ocorrentes em uma determinada região. Essa disciplina encontra sua base na compreensão da distribuição geográfica das zonas sísmicas, intimamente associada à configuração das falhas tectônicas e outros fenômenos geológicos que permeiam a crosta terrestre. A atividade sísmica, por sua vez, está intrinsecamente relacionada a aspectos temporais e espaciais, bem como às propriedades fisiográficas e geológicas específicas de uma determinada área. Assim, a sismicidade de um local pode variar significativamente, resultando em mapas sísmicos que indicam epicentros e a frequência de terremotos em períodos específicos.

4.3.1 Sismicidade no Brasil

O Brasil, por muito tempo, foi considerado predominantemente assísmico, devido à sua localização na plataforma estável da América do Sul, afastado das zonas de atividade tectônica intensa. No entanto, a compreensão desse cenário começou a se transformar na década de 1970, com o estabelecimento de uma rede sismológica e o início da coleta de dados sísmicos no país. Este período marca uma reviravolta significativa na percepção da sismicidade no Brasil, proporcionando uma base para estudos mais aprofundados sobre o tema (ASSUMPÇÃO E NETO, 2000).

O Brasil ingressou efetivamente nos estudos sísmicos na década de 1970, quando dados sismológicos começaram a ser armazenados sistematicamente, e uma rede sismográfica foi implementada. Atualmente, o país conta com 40 estações sismográficas, sendo a Universidade de Brasília responsável por liderar os esforços de monitoramento (LOPES, 2017). Essa expansão na infraestrutura de monitoramento permitiu uma análise mais precisa da atividade sísmica no território brasileiro.

Os registros históricos indicam que eventos sísmicos no Brasil remontam ao início do século XX. A geomorfóloga Allaoua Saadi, do Instituto Geocientífico da

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), mapeou 48 falhas no Brasil, revelando áreas de concentração de terremotos no país. Essa análise proporciona uma compreensão mais detalhada da distribuição geográfica da sismicidade e destaca a importância de investigações contínuas nesse campo (SAADI, UFMG).

A legislação brasileira desempenha um papel crucial na mitigação dos efeitos dos abalos sísmicos em estruturas. A norma brasileira mais recente, atualizada em maio de 2023, representa um avanço significativo nesse contexto. Ao estabelecer diretrizes e parâmetros específicos para o projeto, construção e manutenção de estruturas sismorresistentes, essa normativa reflete o compromisso contínuo do país com a segurança estrutural. A abordagem abrangente da norma inclui considerações sobre materiais sismorresistentes, técnicas construtivas adequadas e padrões de monitoramento.

O estudo da sismicidade no Brasil passou por uma evolução significativa, saindo de uma percepção de predominante assismicidade para uma compreensão mais refinada da atividade sísmica. A presença de 40 estações sismográficas e a atualização da norma brasileira em 2023 refletem o comprometimento do país em enfrentar os desafios sísmicos. O foco na resiliência estrutural, com considerações detalhadas sobre materiais, técnicas construtivas e monitoramento, posiciona o Brasil em um patamar avançado na gestão de estruturas metálicas diante de abalos sísmicos. Essa abordagem não apenas fortalece a segurança das edificações, mas também contribui para a evolução contínua da pesquisa sísmica no país. No quadro 4, os dados são fornecidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP). A magnitude média é calculada com base nas escalas sismológicas utilizadas.

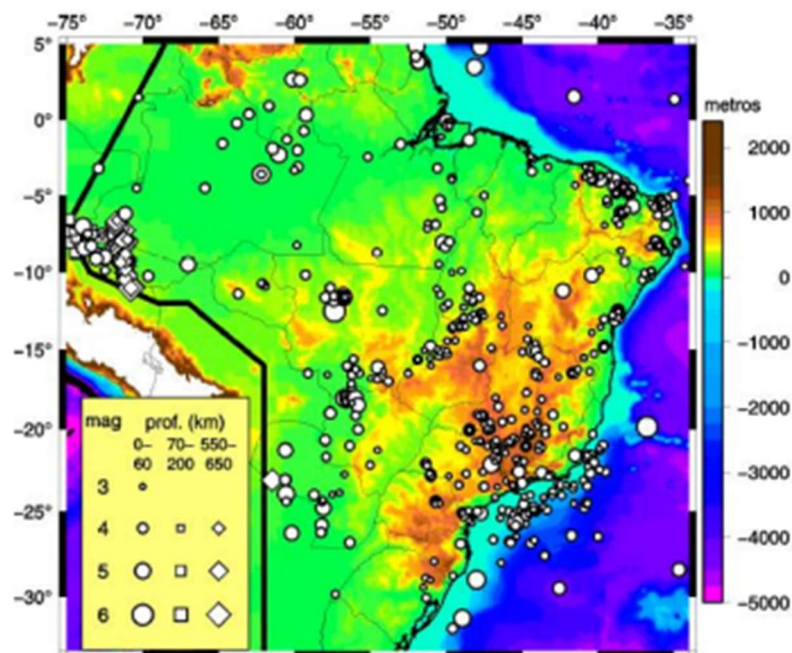
Quadro 4 - Boletim Sísmico Brasileiro (IAG – USP)

Ano	Número de Ocorrências	Magnitude Média	Regiões Mais Afetadas
2020	120	3.5	Nordeste e Sudeste
2021	98	3.2	Norte e Centro-Oeste
2022	110	3.8	Sul e regiões próximas a falhas mapeadas
2023	(até maio)	3.6	Nordeste e Centro-Oeste

Fonte: IAG – USP, 2010

De acordo com a análise do mapa sísmico (Figura 5), constata-se que as regiões mais propensas a atividades sísmicas são o Sudeste e o Nordeste, seguidos pelo Norte e Centro-Oeste, e, por último, o Sul. O Nordeste emerge como a região mais impactada por terremotos, destacando-se com a maior incidência. Em segundo lugar, o Acre é identificado como o estado com a segunda maior taxa de ocorrências sísmicas no Brasil. Contudo, mesmo para aqueles que residem em regiões menos afetadas, a imunidade a esse fenômeno natural não deve ser presumida.

Figura 5 : Boletim Sísmico Brasileiro (IAG – USP)



Fonte: IAG – USP,2010

É importante ressaltar que, embora não seja comum a manifestação de terremotos de grande magnitude no território nacional, a sua ocorrência não pode ser descartada. Em toda a extensão do Brasil, registros indicam eventos sísmicos, e mesmo regiões menos propensas ainda podem ser impactadas. O Quadro 5 destaca os maiores terremotos já registrados no país, fornecendo uma perspectiva histórica desses eventos. A magnitude é baseada na Escala Richter. Danos e consequências variam de acordo com a intensidade do abalo sísmico e a infraestrutura local.

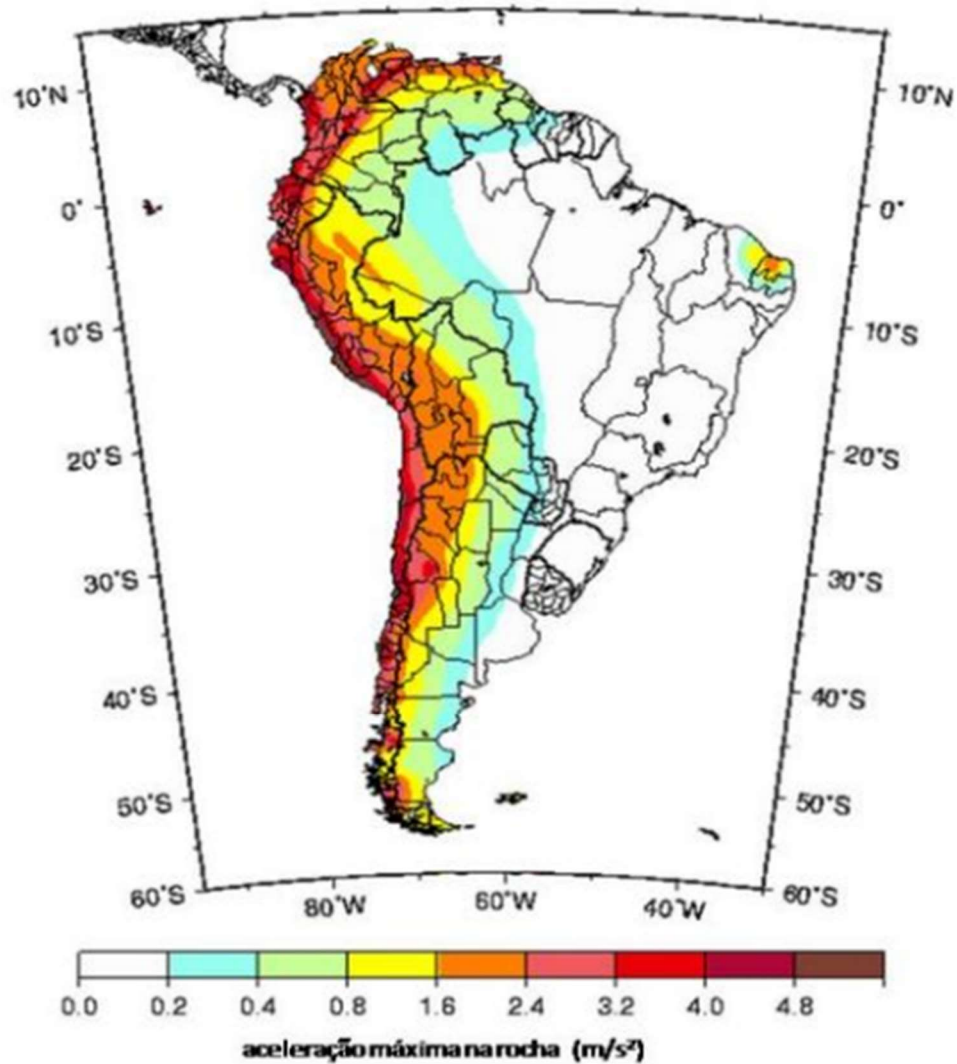
Quadro 5 – Maiores abalos sísmicos do Brasil

Data	Localização	Magnitude	Consequências e Observações
10/11/1938	João Câmara, RN	6.8	Danos significativos em construções, sendo um dos mais fortes.
05/11/1955	Floraí, PR	5.6	Danos leves em algumas construções, sentido em diversas cidades.
29/07/1962	Vazante, MG	6.1	Danos moderados, sensação sentida em estados vizinhos.
16/02/1973	João Câmara, RN	4.9	Repercussões locais, sem grandes danos estruturais.
09/04/2008	Acrelândia, AC	5.2	Sentido em várias cidades do Acre, sem danos significativos.

Fonte: PARISENTI, 2011

O referido mapa da Figura 6 revela que o Brasil geralmente experimenta uma baixa atividade sísmica, com acelerações do solo inferiores a $0,4 \text{ m/s}^2$ e uma probabilidade de 90% de que esses valores não sejam ultrapassados ao longo de um período de 50 anos (PEÑA, 2012). Contudo, na região Nordeste e em partes das regiões Norte e Centro-Oeste, tais acelerações do solo não podem ser consideradas negligenciáveis.

Figura 6: Sismicidade da América do Sul



Fonte: FERREIRA, 2016

Pode-se observar que as acelerações médias do Brasil não ultrapassam 0,2 m/s² (0,02g), mas no estado do Ceará (Nordeste), estes valores podem chegar a 2,4 m/s² (0,24g).

Apesar da baixa frequência, terremotos com magnitudes significativas podem ocorrer no Brasil. Richter descobriu que o número de terremotos em uma determinada região diminui aproximadamente dez vezes com cada aumento de magnitude. No Brasil, ocorrem 20 terremotos com magnitudes superiores a três a cada ano. A partir disso, pode-se deduzir que terremotos com magnitudes acima de sete devem ocorrer no Brasil a cada 500 anos. Em regiões com alta atividade sísmica, como o Chile, terremotos dessa magnitude ocorrem em média a cada três anos (ASSUMPÇÃO E NETO, 2000).

Como a maioria dos terremotos no Brasil são de pequena magnitude (4,5 na escala Richter), a história mostra que grandes terremotos podem ocorrer mesmo em "regiões calmas". Embora não seja alarmante, a magnitude da sismicidade brasileira precisa ser considerada em alguns projetos de engenharia, especialmente em estruturas que serão instaladas em regiões de maior risco.

5. DINÂMICA ESTRUTURAL E ANÁLISE SÍSMICA

A análise dinâmica de estruturas é uma área de extrema relevância na engenharia estrutural, especialmente considerando que edifícios estão constantemente sujeitos a ações que variam ao longo do tempo, podendo levar a deformações permanentes e danos acumulativos. Um aspecto crucial da análise dinâmica é o estudo de estruturas sujeitas a estímulos sísmicos. Diversos fenômenos sísmicos de diferentes origens estão presentes em praticamente toda a superfície terrestre. A geração de terremotos artificiais torna-se necessária em muitos casos, especialmente quando registros de aceleração sísmica local são inadequados. Métodos como a sobreposição aleatória de harmônicos, são amplamente empregados para criar registros artificiais derivados de eventos sísmicos próximos, mantendo a compatibilidade de frequência. Além disso, a análise dinâmica deve abordar sistemas não lineares no domínio da frequência. Destaca-se a importância de investigar sistemas não lineares sob excitações sísmicas com alto conteúdo harmônico. A compreensão da distribuição e intensidade desses harmônicos é crucial para estruturas com frequências naturais próximas a essas áreas de concentração (MUNÓZ, 2015).

A transformação das equações de movimento não lineares para o domínio da frequência é desafiadora, sendo o Método do Equilíbrio Harmônico (MEH) um dos métodos mais populares para essa transformação. No estudo da resposta não linear de estruturas a eventos sísmicos, efeitos não lineares são observados desde o início do carregamento. Estruturas de aço, por exemplo, podem manifestar não linearidades devido a efeitos de segunda ordem, comportamento inelástico e flexibilidade das ligações. Uma análise avançada usando ferramentas numéricas precisas é fundamental para avaliar completamente a estrutura, verificando sua resistência e estabilidade. Análises avançadas proporcionam uma compreensão profunda do comportamento não linear de estruturas de aço. Essas análises são

fundamentais para garantir a segurança e a eficiência dessas estruturas em situações dinâmicas complexas (MUNÓZ, 2015).

A análise estrutural dinâmica é essencial para entender a resposta de uma estrutura quando submetida a forças dinâmicas, como terremotos, ventos fortes, ondas do mar e cargas de choque. Utilizando o princípio do trabalho virtual, é possível obter a equação de equilíbrio que governa o comportamento dinâmico de um sistema estrutural. Entretanto, a falta de informações detalhadas sobre os mecanismos de amortecimento das estruturas apresenta um desafio. A avaliação e a geração de parâmetros relacionados à matriz de amortecimento são dificultadas quando estudos experimentais específicos não estão disponíveis para uma determinada estrutura (MUNÓZ,2015).

5.1 Análise dinâmica

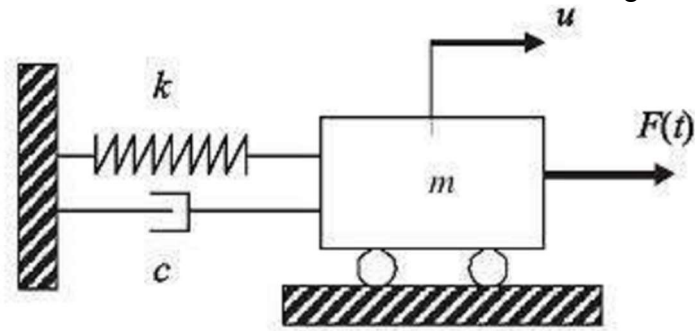
A resposta estrutural a um terremoto é um fenômeno dinâmico no qual as deformações e tensões introduzidas na estrutura resultam do movimento aleatório de sua base. Descrever o comportamento de estruturas de aço em caso de forte movimentação de terra é um desafio para os engenheiros, pois geralmente apresentam deformações inelásticas nessas condições.

5.1.2 Análise dinâmica - sistema de um grau de liberdade (SGL)

O conhecimento de sistemas com um grau de liberdade é essencial para entender a dinâmica de estruturas mais complexas e sistemas com vários graus de liberdade.

A resposta dinâmica de muitas estruturas pode ser expressa por sistemas com um grau de liberdade, como na Figura 7. Em estruturas lineares de formas mais complexas, a resposta dinâmica total pode ser expressa como a soma (superposição linear) das respostas de uma série de SGLs. A análise dinâmica SGL, portanto, fornece a base para a análise determinística da grande maioria dos sistemas estruturais.

Figura 7: Sistema massa, mola e amortecedor com um grau de liberdade



Fonte: PARISENTI, 2011

Todos os sistemas estruturais possuem três componentes básicos: rigidez (k), massa (m) e amortecimento (c), relacionados aos três tipos de força mais característicos dos problemas de vibração: forças elásticas, forças de inércia ou forças de dissipação de energia.

A equação do movimento é dada pela equação abaixo:

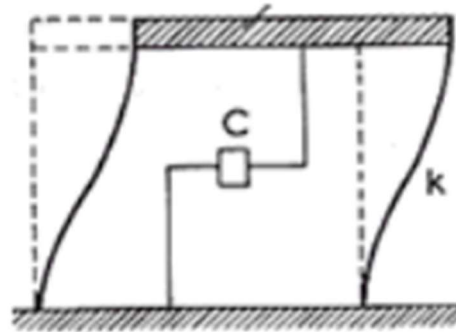
$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = f(t) \quad (2)$$

Sendo m a massa, c constante de amortecimento e k representa a constante de rigidez do sistema; u , \dot{u} , \ddot{u} e $f(t)$, são, respectivamente o deslocamento, velocidade, aceleração e a força externa aplicada no sistema.

Muñoz (2015), expressa que o número de graus de liberdade é o número de coordenadas independentes necessárias para indicar a posição de um sistema em um determinado momento. Estruturas contínuas têm um número infinito de graus de liberdade. A maneira de idealizar um modelo matemático adequado, portanto, nos permite reduzir os graus de liberdade a um número discreto e, em alguns casos, a apenas um.

Um exemplo de estrutura com um grau de liberdade é mostrado na Figura 8. É uma estrutura plana em que a viga é infinitamente rígida e a massa dos pilares é desprezível. Com uma força horizontal exercida sobre a viga, o sistema funciona como um sistema com um único grau de liberdade (deslocamento horizontal da viga), com a massa da viga concentrada em seu centro e a rigidez ao cisalhamento dos dois apoios ($= k$) e também o amortecimento é adicionado ($= c$).

Figura 8 - Sistema de um grau de liberdade



Fonte: PARISENTI, 2011

5.1.3 SGL Submetido a vibração livre

Vibrações livres são aquelas que são criadas no sistema quando não há força externa exercida sobre o sistema que muda ao longo do tempo, apenas devido às condições iniciais impostas. A obtenção da frequência natural de vibração de um sistema com um grau de liberdade é usualmente introduzida desprezando-se o efeito do amortecimento do sistema estrutural ($c = 0$) e as forças externas aplicadas à estrutura ($f(t) = 0$) (MENDES, 2005). Desta forma, a equação de equilíbrio dinâmico (3) pode ser escrita da seguinte forma:

$$m \ddot{u}(t) + k u(t) = 0 \quad (3)$$

Uma vez que não existem forças externas aplicadas, a oscilação do sistema é devida apenas às condições iniciais (deslocamento e velocidade iniciais), desta forma a resposta em deslocamento $u(t)$ tem de verificar as condições iniciais (MENDES, 2012).

Para casos em que se pretende determinar a resposta estrutural para uma ação dinâmica qualquer, a equação de equilíbrio dinâmico (com a forma da equação (2)) pode ser resolvida no domínio do tempo, recorrendo ao integral de Duhamel, ou transpondo-a para o domínio da frequência, através da transformada de Fourier (PARISENTI, 2011).

5.1.4 Amortecimento no processo vibratório

Para tornar a atenuação mais compreensível, imagine uma barra na parte inferior e superior livre com uma massa nessa posição. Quando a barra é removida de sua posição de equilíbrio, esta barra vibraria regularmente em oscilação livre e sua amplitude diminuiria a cada oscilação até retornar à sua posição original. Se não houvesse amortecimento neste sistema, a oscilação, uma vez causada, duraria por um período indefinido de tempo.

A Figura 9 ilustra como os sistemas estruturais dinâmicos dissipam energia por meio de seus mecanismos de amortecimento. O amortecimento está presente em todos os sistemas de vibração e faz com que a energia seja removida do sistema. A perda de energia é removida do sistema por um mecanismo de radiação ou por dissipação dentro do próprio sistema. O efeito de amortecimento em um processo de vibração é obtido convertendo (derivando) a energia mecânica do movimento de vibração em outros tipos de energia, como o calor que pode ser liberado pelo sistema. Essa perda de energia leva a uma diminuição da amplitude da vibração livre (redução da intensidade da vibração), ou seja, o principal efeito de amortecimento é o declínio dos picos de aceleração e deslocamento da estrutura (PARISENTI, 2011).

Figura 9 - Esquema representando sistema de amortecimento



Fonte: PARISENTI, 2011

O amortecimento ocorre devido a fatores internos ou externos. Os internos surgem do material e os externos do contato externo com elementos não estruturais, por exemplo, a energia de radiação no solo. Existem diferentes tipos de amortecimento, viscoso, estrutural ou histerético, coulomb, etc.

O amortecimento a seco ou coulombiano ocorre devido ao atrito entre dois sólidos com pouca ou nenhuma lubrificação. O amortecimento estrutural ou material ou histerético ocorre devido ao atrito interno entre as moléculas quando o sólido é deformado, fazendo com que a energia seja dissipada através do material.

Segundo Parisenti (2011), existem muitos mecanismos pelos quais a energia de um sistema é dissipada. Estimar o amortecimento em estruturas é, portanto, uma das tarefas mais difíceis na dinâmica estrutural. Frequentemente, é muito difícil determinar que tipo de amortecimento está presente em uma estrutura particular. Frequentemente, o amortecimento real em uma estrutura é uma combinação de vários tipos. Em muitos casos, entretanto, o amortecimento é baixo e certas simplificações podem ser feitas. No caso de cargas de curta duração, por exemplo no caso de explosões ou vibrações, o efeito de amortecimento não é significativo. Com a excitação sísmica geralmente não há tempo para o desenvolvimento do amortecimento viscoso, mas o amortecimento histerético ocorre nos materiais das estruturas.

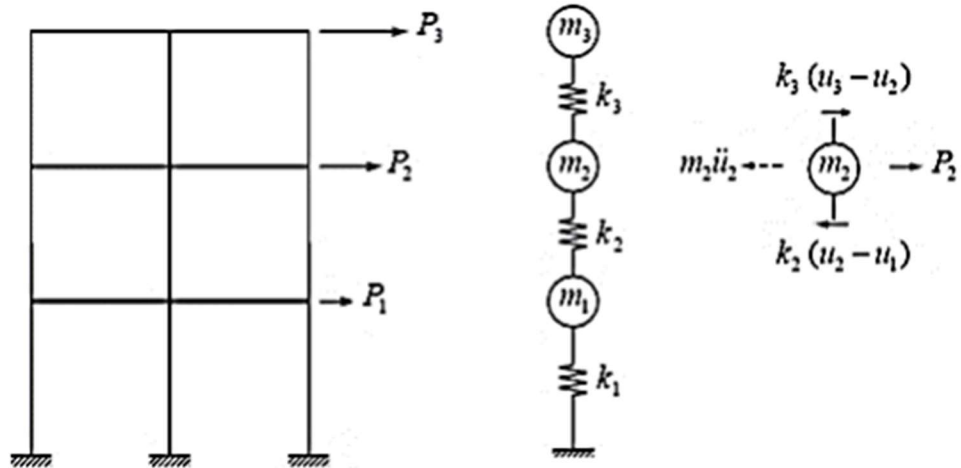
O amortecimento histerético é resultante do atrito no arranjo molecular de um corpo. O atrito interno entre os planos que escorregam ou deslizam à medida que o material se deforma, o que acontece quando há vibração, é responsável por parte da dissipação da energia vibratória e, conseqüentemente, diminuição da amplitude da vibração livre. Esse tipo de amortecimento é conhecido como amortecimento por histerese, ou amortecimento estrutural (RAO, 2008).

5.1.5 Análise dinâmica - Sistema de vários graus de liberdade

Ao trabalhar com sistemas estruturais reais, vários graus de liberdade geralmente devem ser levados em consideração, cada um correspondendo a uma coordenada independente. Geralmente existem estruturas reais com infinitos graus de liberdade, mas é possível reduzi-los a um número finito, visto que os deslocamentos intermediários dos elementos podem ser expressos em função dos deslocamentos dos nós extremos da estrutura. O número de graus de liberdade deve ser igual ao número de componentes de deslocamento que são necessários para definir adequadamente a deformação do sistema para o tipo de excitação de interesse e, conseqüentemente, ser capaz de determinar as forças internas com aproximação suficiente. Em edifícios expostos a cargas sísmicas, os principais

estímulos são as acelerações horizontais, que provocam deformações laterais da estrutura e cujos importantes graus de liberdade independentes são os deslocamentos horizontais dos nós (PARISENTI, 2011).

Figura 10 - Sistema com vários graus de liberdade



Fonte: PARISENTI, 2011

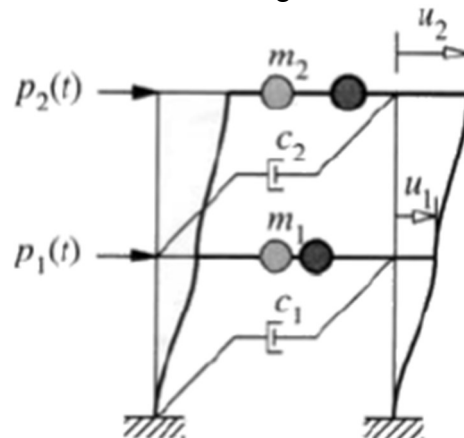
Portanto, para sistemas com vários graus de liberdade, conforme mostrado na Figura 10, a equação geral do movimento (4) é dada pela seguinte equação:

$$\{m\} \ddot{U} + \{c\} \dot{U} + \{k\} U = F(t) \quad (4)$$

Em que M , C e K são, respectivamente, as matrizes de massa, de amortecimento e de rigidez da estrutura, e U , \dot{U} , \ddot{U} e $F(t)$ são os vetores de deslocamentos, velocidades, acelerações e forças aplicadas, respectivamente.

O exemplo abaixo é uma estrutura generalizada com 2 graus de liberdade (2GL) onde uma estrutura plana na qual as vigas são consideradas rígidas é concentrada com toda a sua massa no centro e as massas dos pilares. O sistema pode ser visualizado como uma combinação dos três componentes, rigidez, amortecimento e massa, conforme mostrado na Figura 11:

Figura 11: Sistema com dois graus de liberdade (pórtico)



Fonte: PARISENTI, 2011

Para modelos em que a massa se encontra distribuída por toda a estrutura, é necessário considerar a transmissão de forças de inércia. Nestes casos, a matriz de massa (5) que se obtém é uma matriz em “banda”, com a seguinte forma (MENDES, 2012):

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & \dots & M_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Os coeficientes desta matriz podem ser obtidos através do princípio dos trabalhos virtuais (PTV) ou do método dos elementos finitos (MEF). Por exemplo, utilizando o MEF, os coeficientes da matriz de massa “m” são definidos pela equação abaixo (6) (MENDES, 2012):

$$m_{ij} = \int_V m N_i N_j dV \quad (6)$$

Em que “m” representa a massa específica do material (kg / m^3) e N_i e N_j as funções de forma.

5.2 Análise Sísmica

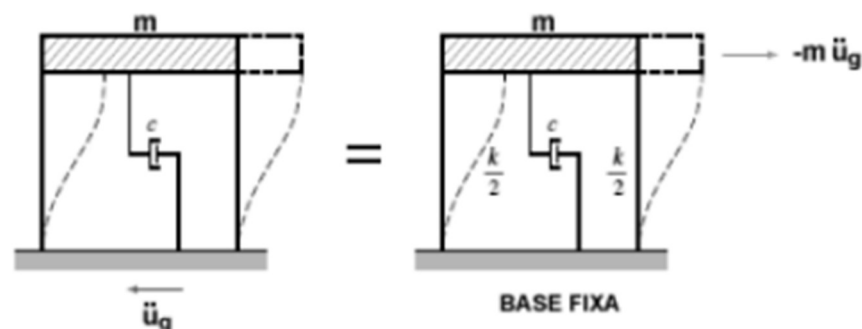
Durante um abalo, a energia sísmica transferida para a estrutura é dissipada pelos movimentos e deformações dos elementos estruturais na forma de energia cinética, energia de amortecimento, energia de deformação elástica e energia de histerese inelástica. Análises numéricas de estruturas são realizadas a fim de mapear o comportamento de edifícios reais com alguma precisão. Essas análises são muito úteis, pois tornam o processo de avaliação do projetista mais fácil e rápido (BATELO, 2014).

5.2.1 Análise sísmica - sistema de um grau de liberdade

Considere um pórtico plano mostrado na Figura 12, cuja base é excitada por um acelerograma $a_g(t) = \ddot{u}_g(t)$ causado por um terremoto na direção horizontal (onda do tipo S). As seguintes hipóteses são permitidas (PARISENTI, 2011):

- Apenas deslocamentos horizontais são levados em consideração (uma rigidez axial infinita é definida para as colunas);
- Os nós são restritos à rotação;
- A excitação nos apoios age apenas horizontalmente;
- A fixação total entre a estrutura de suporte e o subsolo é admitida.

Figura 12: Esquema proposto para análise



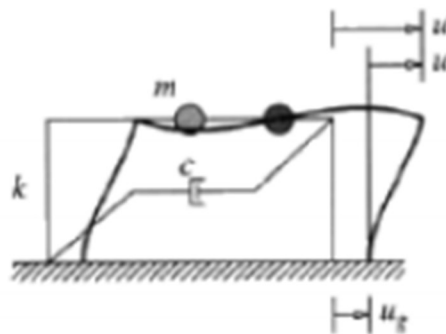
Fonte: PARISENTI, 2011

O pórtico plano pode então ser representado por um sistema com um único grau de liberdade, o movimento do qual (ver Figura 12) pode ser expresso conforme a equação (7):

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m a_g(t) \quad (7)$$

Observa-se, assim, que a força sísmica equivalente atuando no sistema é igual ao produto da massa e aceleração da coluna $a_g(t)$ (caso sísmico), conforme mostrado na Figura 13, assim como na aplicação de um carregamento externo $F(t)$ em um sistema de base fixa. O sinal negativo indica que a força equivalente atua contra a direção da aceleração de suporte, embora a aceleração básica seja assumida em qualquer direção no caso de um terremoto.

Figura 13: Sistema de um grau de liberdade (pórtico)

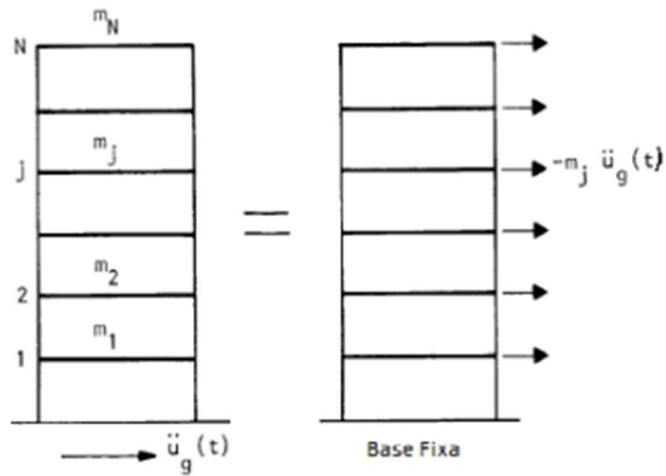


Fonte: PARISENTI, 2011

5.2.2 Análise sísmica - sistema de vários graus de liberdade

Consideremos agora um edifício de vários andares modelado por um pórtico plano, conforme mostrado na Figura 14, para o qual são admitidas as mesmas hipóteses do ponto anterior, com a massa da estrutura concentrada na altura de cada andar. Excitando a fundação do edifício, existe o seguinte esquema de carregamento equivalente para a estrutura de base fixa, semelhante ao que foi visto para a estrutura de um andar no item anterior.

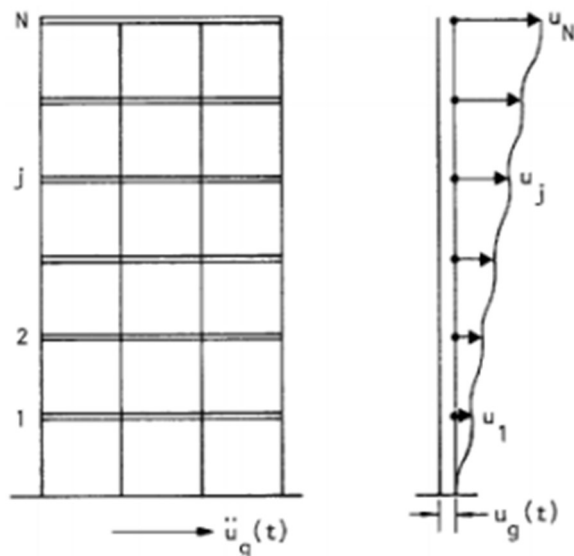
Figura 14: Esquema de aplicação do carregamento



Fonte: PARISENTI, 2011

Mesmo para um pórtico com mais de duas linhas de colunas, conforme mostrado na Figura 14, o mesmo modelo da Figura 12 pode ser adotado. Para este modelo em consideração, assume-se então que todos os pontos pertencentes ao mesmo piso se movem da mesma maneira. Portanto, este modelo pode ser reduzido por uma única linha de apoio, adicionando a rigidez à força de cisalhamento dos pilares e os coeficientes de amortecimento para cada piso (PARISENTI, 2011).

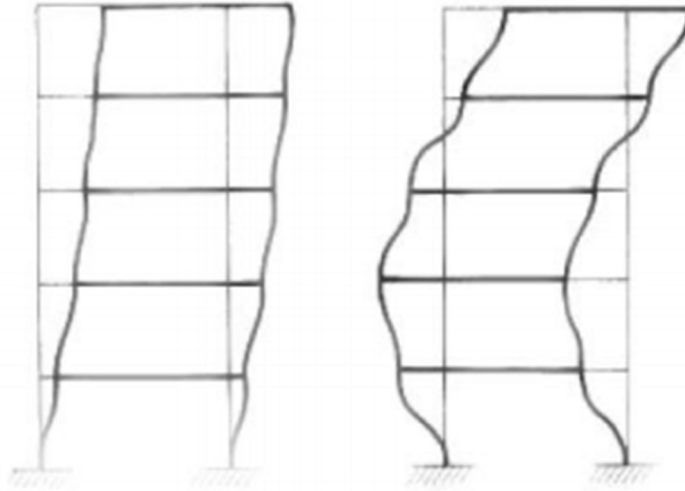
Figura 15: Esquema de carregamento – Múltiplos pavimentos



Fonte: PARISENTI, 2011

Para o modelo da Figura 15, os N modos de vibração são obtidos a partir da análise dos modos de vibração, alguns dos quais são mostrados na Figura 16:

Figura 16: Modos de vibração natural



Fonte: PARISENTI, 2011

Para pórticos sujeitos a cargas laterais, as contribuições dos primeiros módulos são geralmente mais importantes, e o limite superior (ou seja, a soma dos deslocamentos máximos em cada modo vibracional no módulo) pode ser levado em consideração sem erros significativos. Nesse caso, a resposta máxima com a resposta do primeiro modo pode ser estimada de forma satisfatória, sem a necessidade de realizar a soma repetida dos modos em cada momento (PARISENTI, 2011).

No entanto, dependendo das frequências de excitação contidas nos gráficos de aceleração de terremotos, os modos mais elevados podem contribuir significativamente para o comportamento geral. As frequências de excitação mais importantes são obtidas com a transformação de Fourier.

6. NBR 15421/2023

A Norma Brasileira NBR 15421:2023, que aborda o projeto de estruturas à prova de terremotos, desempenha um papel crucial na garantia da segurança e estabilidade de edificações em regiões susceptíveis a atividades sísmicas. Embora tenha sido publicada recentemente, sua relevância persiste, e uma análise

aprofundada se faz necessária para compreender os critérios, cálculos e métodos nela estabelecidos.

O surgimento da Norma Brasileira NBR 15421 foi uma resposta crucial à evolução da engenharia civil no contexto brasileiro. Ao longo do tempo, a necessidade de uma regulamentação específica para estruturas sísmicas no país tornou-se cada vez mais evidente. O histórico que levou à criação da norma reflete a preocupação contínua com a segurança estrutural em face das ameaças sísmicas, um aspecto muitas vezes subestimado em regiões com histórico sísmico menos proeminente. No cenário internacional, a atenção à segurança sísmica cresceu exponencialmente ao longo das últimas décadas, impulsionada por eventos significativos que destacaram a vulnerabilidade das estruturas a terremotos. Essa norma, não apenas reflete a consciência global sobre a importância da preparação para atividades sísmicas, mas também estabelece padrões específicos adaptados à realidade geológica e estrutural do Brasil.

A NBR 15421 é extremamente relevante nos dias atuais e continua a ser uma referência essencial para profissionais da engenharia, arquitetos e outros envolvidos no projeto e construção, especialmente em regiões propensas a eventos sísmicos. A relevância atual da norma se destaca não apenas pela sua aplicação em áreas diretamente afetadas por terremotos, mas também pela necessidade de um planejamento preventivo em regiões historicamente menos suscetíveis. O entendimento da norma transcende as áreas geográficas imediatamente expostas a atividades sísmicas, pois a prevenção e a preparação são elementos essenciais da engenharia estrutural moderna. Além de sua relevância nacional, a NBR 15421 também ecoa internacionalmente, contribuindo para o acervo global de normas e práticas que visam a segurança contra terremotos. Sua existência demonstra a capacidade do Brasil em seguir padrões internacionais de segurança, ao mesmo tempo em que adapta esses padrões às peculiaridades de sua geologia e demandas construtivas.

A norma brasileira tem o potencial não apenas de influenciar práticas sísmicas em regiões semelhantes em todo o mundo, mas também de estimular o diálogo global sobre a importância de normas específicas para diferentes contextos sísmicos. Apesar da relevância contínua da NBR 15421, a implementação plena enfrenta desafios, principalmente em regiões do Brasil com baixa atividade sísmica. Estratégias educacionais, conscientização e incentivos para adoção da norma são

vitais para superar esses desafios e garantir uma abordagem mais abrangente à segurança sísmica.

O Brasil, pela sua vastidão territorial, apresenta uma diversidade geográfica significativa, refletindo-se nas diferentes ameaças naturais a que suas regiões estão sujeitas. Grande parte do Brasil está situada em uma zona com baixa atividade sísmica e devido à distribuição desigual dessa atividade é criado um cenário onde as estruturas não enfrentam as mesmas cargas e esforços observados em áreas mais propensas a terremotos. Essa baixa demanda sísmica em muitas regiões contribui para a falta de discussões técnicas recentes sobre a norma.

Além da baixa atividade sísmica, as regiões mais suscetíveis a terremotos, como o extremo oeste das regiões norte e centro-oeste do país, enfrentam o desafio adicional de serem menos povoadas. A escassez de demanda por estruturas sísmicas nessas áreas pode resultar em uma menor conscientização e aplicação da norma, o que, por sua vez, impacta a disseminação do conhecimento técnico sobre seu uso. Apesar dos desafios, a importância da norma nessas regiões mais suscetíveis não pode ser subestimada. Mesmo que a demanda atual possa ser menor, a prevenção e preparação são fundamentais para garantir a segurança das estruturas em face de possíveis eventos sísmicos no futuro. A aplicação preventiva da norma nessas regiões é uma expressão de responsabilidade social e uma salvaguarda contra futuras ameaças.

Os critérios de verificação estabelecidos pela NBR 15421 representam a espinha dorsal do processo de garantir a resiliência sísmica das estruturas. Esses critérios são formulados de maneira rigorosa para assegurar que as edificações sejam capazes de resistir eficazmente às forças dinâmicas induzidas por eventos sísmicos. Uma análise minuciosa desses critérios revela a profundidade técnica necessária para atender aos elevados padrões estabelecidos pela norma, visto que eles incorporam considerações dinâmicas fundamentais, reconhecendo a natureza oscilante e vibratória dos terremotos. Isso implica que as estruturas devem ser projetadas não apenas para suportar cargas estáticas convencionais, mas também para resistir e dissipar as energias dinâmicas associadas a movimentos sísmicos.

Outro aspecto crucial dos critérios de verificação é a consideração dos parâmetros geotécnicos locais. A norma reconhece que as características do solo desempenham um papel significativo na resposta de uma estrutura a um terremoto. Portanto, os engenheiros devem avaliar e levar em conta os dados geotécnicos

específicos da região durante o projeto. Os critérios também abrangem o dimensionamento preciso dos elementos estruturais, considerando não apenas a resistência aos esforços sísmicos, mas também a capacidade de deformação controlada.

O equilíbrio entre a rigidez necessária para resistir às forças sísmicas e a capacidade de absorver deformações sem comprometer a integridade estrutural é uma consideração complexa. A norma também incorpora uma abordagem probabilística, reconhecendo a incerteza inerente aos eventos sísmicos. Os critérios consideram não apenas os cenários de terremotos prováveis, mas também avaliam a probabilidade de ocorrência desses eventos. Isso requer uma análise estatística aprofundada e a aplicação de métodos probabilísticos para garantir que as estruturas sejam projetadas para resistir a uma variedade de cenários sísmicos possíveis. A NBR 15421 também incentiva a integração de inovações tecnológicas no processo de verificação. Isso implica que, à medida que novas tecnologias e métodos de projeto se desenvolvem, eles devem ser considerados e, se apropriado, incorporados para aprimorar a capacidade das estruturas de resistir a terremotos. (NBR 15421/2023)

A quantificação precisa dos esforços sísmicos é uma etapa crucial no processo de projeto de estruturas à prova de terremotos, conforme estabelecido pela norma. Essa fase não apenas visa determinar a magnitude das forças dinâmicas envolvidas, mas também assegura que os elementos estruturais sejam dimensionados de maneira adequada para resistir aos impactos esperados. A exploração dos métodos de quantificação delineados na norma oferece uma visão mais aprofundada de como as forças sísmicas são cuidadosamente consideradas durante o projeto. A NBR 15421 define métodos precisos para a avaliação da aceleração sísmica, considerando as características específicas do local. Essa quantificação envolve a análise da resposta dinâmica do solo e a determinação das acelerações máximas esperadas durante um evento sísmico. A norma também faz uso de espectros de resposta sísmica, ferramentas gráficas que representam a relação entre a aceleração sísmica e a frequência das estruturas. Essa abordagem permite uma análise mais detalhada da resposta dinâmica, contribuindo para a identificação de faixas críticas de frequência. A quantificação de esforços sísmicos, conforme preconizada pela norma, não se limita apenas à determinação de forças

estáticas equivalentes. Ela abrange considerações dinâmicas, incorporando a resposta em frequência das estruturas.

Os cálculos de resistência desempenham um papel crucial na garantia da integridade estrutural sob a influência de terremotos. A NBR 15421, ao estabelecer diretrizes específicas, define parâmetros críticos que os engenheiros devem considerar ao dimensionar elementos estruturais. Os cálculos de resistência envolvem o dimensionamento preciso de elementos estruturais para resistir aos esforços sísmicos esperados. Isso inclui a determinação de seções transversais adequadas, a escolha de materiais robustos e a consideração das capacidades de carga dinâmica. Além do dimensionamento, a norma enfatiza a importância da análise da capacidade de deformação das estruturas. Isso implica a avaliação de como os elementos estruturais responderão às deformações geradas pelo terremoto, garantindo que a integridade estrutural seja mantida mesmo durante eventos sísmicos extremos. A análise detalhada desses cálculos destaca a necessidade de uma abordagem holística para garantir não apenas a resistência, mas também a capacidade de absorver deformações sem comprometer a estabilidade.

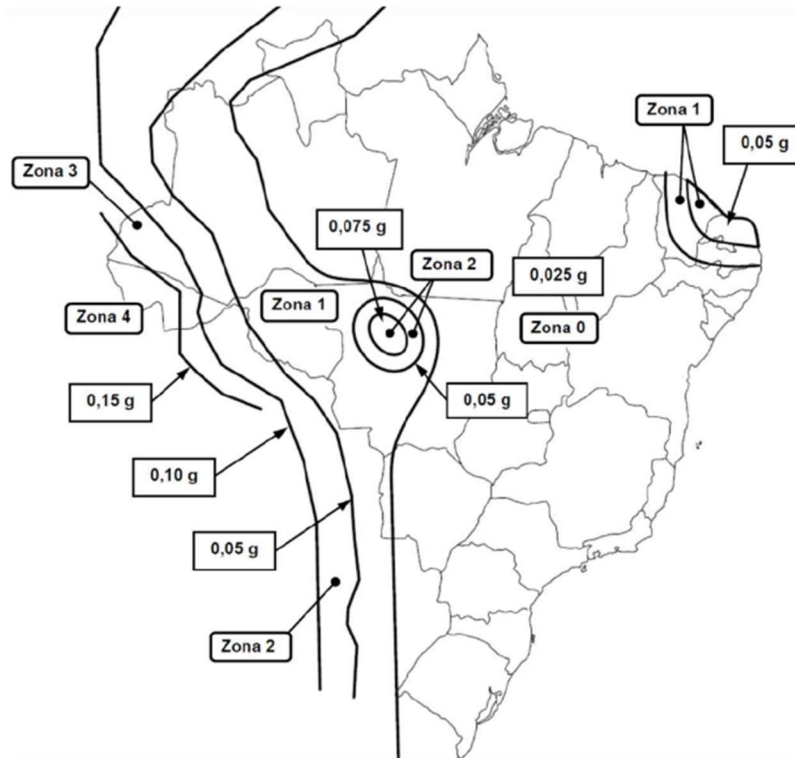
A NBR 15421 incorpora fatores de segurança específicos para lidar com a incerteza inerente aos eventos sísmicos. Esses fatores consideram variações nas características do solo, imprecisões nos parâmetros estruturais e outros elementos que podem afetar a resposta sísmica. Os métodos de projeto definidos são elementos cruciais que ligam a teoria à prática, proporcionando aos engenheiros as ferramentas necessárias para implementar efetivamente os princípios estabelecidos na norma. Os métodos exigem uma análise estrutural avançada para avaliar o comportamento dinâmico das edificações. Isso vai além da simples verificação estática e incorpora técnicas como análise modal espectral, análise de resposta não linear e simulações numéricas avançadas.

A norma preconiza a aplicação de estratégias de mitigação de riscos como parte integrante dos métodos de projeto. Isso inclui a identificação de vulnerabilidades específicas da estrutura, a implementação de dispositivos de controle de vibrações e a consideração de técnicas inovadoras, como amortecedores sísmicos. O uso de materiais que possuem propriedades específicas para absorver e dissipar energia sísmica, a utilização de acessórios, como amortecedores viscosos, base isoladores e sistemas de dissipação de energia, é

uma parte fundamental desses métodos. Essa abordagem prática destaca a importância da escolha de materiais específicos para melhorar a resposta dinâmica das estruturas. A norma também incentiva a modelagem estrutural avançada como parte integrante dos métodos de projeto. Isso envolve a representação fiel das características físicas e dinâmicas da estrutura, permitindo simulações precisas de comportamento sob condições sísmicas. A utilização de ferramentas de modelagem avançada, como análise por elementos finitos, contribui para uma compreensão mais precisa e refinada das respostas estruturais, facilitando decisões de projeto mais informadas. Ademais é citado a integração de tecnologias de monitoramento para avaliação pós-implementação. Isso inclui a instalação de sistemas de monitoramento sísmico em edificações críticas, permitindo a coleta contínua de dados sobre o desempenho real durante eventos sísmicos. Essa abordagem prática é fundamental para avaliar a eficácia do projeto ao longo do tempo e ajustar estratégias conforme necessário.

Um estudo de sismicidade na América do Sul foi desenvolvido por Falconi (2003) que realizou uma análise comparativa entre as normas de seis países, não estando o Brasil representado neste grupo. Por meio desse estudo e levando em consideração a continuidade geográfica entre os países vizinhos, foi possível definir as zonas sísmicas do Brasil apresentadas na NBR 15421. Ela divide o território brasileiro em cinco zonas sísmicas, conforme pode ser visto no mapa mostrado na Figura 17, de acordo com as áreas definidas na Tabela 1. Essas zonas são extremamente importantes na definição de outros parâmetros e métodos de análise, com o valor da aceleração sísmica horizontal (U_g) sendo a primeira (e essencial) variável associada a ele, e g a aceleração da gravidade.

Figura 17: Zoneamento da aceleração sísmica do Brasil, para terrenos da classe B (“Rocha”)



Fonte: NBR 15421/2023

Tabela 1 – Aceleração sísmica horizontal do solo segundo a NBR 15421 (2023)

Zona sísmica	Categoria sísmica	Valores de u_g
Zona 0		$u_g = 0,025 g$
Zona 1	A	$0,025 g \leq u_g \leq 0,05 g$
Zona 2	B	$0,05 g \leq u_g \leq 0,10 g$
Zona 3		$0,10 g \leq u_g \leq 0,15 g$
Zona 4	C	$u_g = 0,15 g$

Fonte: NBR 15421/2023

SANTOS et al. (2010) afirmam que os valores assumidos são conservadores, o que se deve à falta de dados precisos para o cálculo das acelerações características do projeto. SANTOS; LIMA (2005), asseguram que o estudo foi baseado no mapa global de risco sísmico, o Global Sismic Hazard Maps.

A maior parte do Brasil tem uma aceleração sísmica horizontal de 0,025 g, o que significa que não há terremotos significativos. No entanto, há atividade sísmica considerável na região nordeste e oeste da região norte. Essas acelerações correspondem a uma probabilidade nominal de 10% de serem ultrapassadas em 50 anos, ou seja, um período de reincidência de 475 anos (SANTOS, et al., 2010).

A geologia do local onde se encontra a estrutura é um ponto crucial para os efeitos das ondas sísmicas, pois as camadas superficiais do terreno apresentam diferentes níveis de rigidez e atenuação. A norma classifica assim o país de acordo com o Quadro 6.

Quadro 6: Classificação de terrenos

Classe do terreno	Designação da classe do terreno	Propriedades médias para os 30 m superiores do terreno	
		\bar{V}_s	\bar{N}
A	Rocha sã	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s	(não aplicável)
B	Rocha	1500 m/s $\geq \bar{V}_s \geq 760$ m/s	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	760 m/s $\geq \bar{V}_s \geq 370$ m/s	$\bar{N} \geq 50$
D	Solo rígido	370 m/s $\geq \bar{V}_s \geq 180$ m/s	$50 \geq \bar{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\bar{V}_s \leq 180$ m/s	$\bar{N} \leq 15$
	-	Qualquer perfil, incluindo camada com mais de 3 m de argila mole	
F	-	Solo que exija 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 (≥ 35 m) de argila mole ou média.	

Fonte: NBR 15421/20023

Para a análise das estruturas, a norma NBR 15421 estabelece os seguintes requisitos para cada categoria sísmica, apresentados na Tabela 1.

Categoria A:

- Zona sísmica 0: nenhum teste de resistência sísmica é necessário.;

- Zona sísmica 1: Estruturas resistentes a forças sísmicas horizontais em duas direções ortogonais e a forças de torção. A carga horizontal aplicada simultaneamente a todos os pisos da estrutura em ambas as direções é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$F_x = 0,01 W_x \quad (8)$$

Sendo que:

F_x é a força sísmica de projeto do piso x ;

W_x é o peso total da estrutura correspondente ao piso x , incluindo todas as cargas operacionais dos equipamentos e caixas d'água acopladas à estrutura. Adicione 25% da taxa accidental em áreas de armazenamento e estacionamento.

Categoria B e C:

Para as estruturas nestas categorias, a norma NBR 15421 permite uma análise sísmica utilizando o processo de aproximação de forças horizontais equivalentes ou utilizando métodos mais rigorosos como o método espectral ou análise de históricos de acelerações no tempo.

Existem dois métodos que são mais comumente usados na análise de impacto sísmico. O primeiro é o processo do método dinâmico, que pode ser feito por espectro de resposta ou análise com acelerações históricas. O segundo é o método das forças horizontais equivalentes, em que o efeito sísmico é representado por forças estáticas proporcionais às cargas gravitacionais sobre a estrutura. A escolha do método a ser usado depende de vários fatores, incluindo: a natureza da estrutura e sua importância social e econômica; a área do terremoto e suas condições geológicas; e as propriedades dinâmicas da estrutura (SANTOS, et al., 2010).

6.1 Análise sísmica pelo método espectral

Este é um método clássico que é consistente com praticamente todos os padrões de projeto para estruturas resistentes a terremotos. É uma análise dinâmica, mas não no domínio do tempo, mas sim no domínio da frequência.

O espectro de resposta de um evento dinâmico é um gráfico que mostra a resposta máxima de uma estrutura quando excitada por uma carga na qual a

frequência varia. No caso de um terremoto, o espectro fornece uma resposta que pode ser dada por uma pseudo-velocidade ou pseudo-aceleração (PARISENTI, 2011).

6.2 Análise sísmica com históricos de acelerações no tempo

Esta análise consiste em um método mais preciso e realista, uma análise dinâmica completa. É necessária a modelagem completa da estrutura e fundação e a aplicação de um histórico de acelerações ao longo do tempo (acelerograma) em sua base que seja compatível com as características sismológicas do local de implantação da estrutura.

O resultado final que se obtém é o habitual, exigindo esforços e respostas de apoio em cada um dos elementos estruturais, mas ao longo do tempo. No entanto, este método não pode ser usado para estruturas brasileiras, pois não existem acelerogramas representativos de nossa realidade, histórico de abalos sísmicos e condições geológicas. No Brasil, os terremotos e seus registros são monitorados constantemente, mas sempre com sismógrafos, que registram quase que exclusivamente a força do evento, e quase nunca com acelerômetros, necessários para fazer acelerogramas.

6.3 Análise sísmica pelo método das forças horizontais equivalentes

Este método é mais simples, estático, baseado no princípio da aplicação de forças horizontais correspondentes à excitação que surgiria na base da estrutura, podendo também ser utilizado para estruturas em qualquer zona sísmica. Nenhuma ferramenta de computação especial ou análise dinâmica rigorosa é necessária. Permite a identificação de forças de torção horizontais e sísmicas. Os deslocamentos estruturais e os efeitos de segunda ordem são determinados pela rigidez da estrutura e pelas forças sísmicas previamente determinadas (forças estáticas).

7. ESTUDO DAS NORMAS SISMO RESISTENTES

Em um cenário onde as ameaças naturais, como os terremotos, podem causar danos elevados à infraestrutura e à segurança das pessoas, a existência de normas sismo resistentes denota-se como elementar. Estas normas são desenvolvidas para fornecer diretrizes específicas sobre como projetar, construir e manter estruturas capazes de resistir aos efeitos prejudiciais de abalos sísmicos (ARAI; SANTOS; LIMA, 2014).

No contexto das estruturas metálicas, as normas são auxiliares na garantia de que essas estruturas possam suportar terremotos com eficácia. As estruturas metálicas podem ser particularmente vulneráveis aos terremotos devido à sua natureza leve e maleável. No âmbito da sismologia, a padronização das abordagens e metodologias é essencial para assegurar a qualidade e a consistência das análises realizadas. Nesse contexto, normas internacionais desempenham um papel crucial, proporcionando diretrizes que regem a coleta de dados, a análise de sismicidade e a elaboração de mapas sísmicos. Fornecem um conjunto unificado de diretrizes e critérios para a condução de estudos sísmicos em escala global. Além de ser essenciais para promover a consistência, a comparabilidade e a qualidade dos dados sismológicos, possibilitando uma abordagem padronizada na análise e interpretação dos eventos sísmicos (GARCÍA *et al.*, 2020).

A International Seismological Centre (ISC) é uma das organizações líderes que estabelecem normas internacionais na sismologia. Essas normas abrangem desde a coleta de dados brutos até a formulação de modelos e mapas sísmicos. A ISC define critérios rigorosos para a uniformidade na categorização dos terremotos, incluindo a padronização de escalas de magnitude e a determinação precisa de epicentros. Isso não apenas assegura a precisão dos dados coletados, mas também facilita a colaboração global e a comparação entre diferentes regiões. Conjuntamente a International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) contribui para a elaboração de normas e procedimentos que transcendem fronteiras nacionais, consolidando práticas e técnicas sismológicas para garantir a coesão e a confiabilidade nas análises. A colaboração entre diferentes países e instituições torna-se mais eficaz quando baseada em normas compartilhadas, promovendo uma compreensão mais abrangente da atividade sísmica global. A implementação consistente dessas normas internacionais não apenas aprimora a qualidade da

pesquisa sismológica, mas também é vital para avaliações precisas de riscos e desenvolvimento de estratégias de mitigação em regiões propensas a terremotos. A padronização proporciona uma base sólida para a construção de modelos sísmicos, o que, por sua vez, é crucial para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes e estratégias eficazes de gestão de desastres.

A NBR 15421:2023, norma brasileira para o projeto de estruturas resistentes a sismos, estabelece diretrizes específicas para o contexto brasileiro. Entretanto, é importante comparar essa norma com as diretrizes sísmicas internacionais para garantir que as estruturas metálicas construídas no Brasil atendam aos padrões globais de segurança. Normas sísmicas internacionais amplamente reconhecidas incluem o Euro código 8 (EC8) na Europa, o Building Code dos Estados Unidos e o New Zealand Seismic Design Code na Nova Zelândia, entre outros (AZEVEDO, 2016).

É verossímil frisar que a adaptação das normas sísmicas para estruturas metálicas pode envolver considerações específicas de engenharia. As características de flexibilidade e ductilidade do aço dispõem de um impacto direto na capacidade das estruturas metálicas de absorver e dissipar a energia gerada por abalos sísmicos (DANTAS, 2013).

As normas sísmicas aplicadas a estruturas metálicas devem abordar aspectos como a rigidez da estrutura, a capacidade de absorção de energia por meio de elementos de dissipação, como amortecedores de atrito e a necessidade de detalhes construtivos que garantam a integridade da estrutura mesmo em condições de terremoto (ARAI; SANTOS; LIMA, 2014).

Isto posto, as estruturas metálicas têm propriedades mecânicas únicas que afetam sua resposta a abalos sísmicos. Sua leveza e ductilidade podem ser vantagens, permitindo uma resposta mais elástica a terremotos, mas também apresentam desafios em termos de amortecimento de energia e capacidade de dissipação de cargas (ARAI; SANTOS; LIMA, 2014).

Durante um terremoto, as estruturas metálicas podem experimentar oscilações e deformações que variam de acordo com a magnitude e a proximidade do epicentro. Para proteger estruturas metálicas contra danos causados por abalos sísmicos, diversas estratégias de mitigação podem ser implementadas. Estas incluem a incorporação de amortecedores sísmicos, dispositivos de dissipação de energia, detalhes construtivos robustos e sistemas de isolamento sísmico. A escolha

de estratégias depende das características específicas da estrutura e das condições sísmicas esperadas (DANTAS, 2013).

Além disso, a manutenção preventiva e a inspeção regular são essenciais para garantir que as estruturas metálicas permaneçam seguras e em conformidade com as normas sísmicas ao longo do tempo (AZEVEDO, 2016).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

À luz das informações abordadas nesta pesquisa, explorou-se diversos aspectos relacionados à sismicidade, análise dinâmica e conceitos fundamentais no projeto sísmo-resistente, com um enfoque aprofundado na normatização brasileira vigente.

Destacou-se, assim, a importância de compreender a sismicidade de uma região, mesmo em áreas com histórico de atividade sísmica relativamente baixa, como é o caso do Brasil. Embora a frequência de terremotos de grande magnitude seja inferior em comparação com regiões altamente sísmicas, a possibilidade de eventos sísmicos não pode ser subestimada, tornando-se imprescindível que projetistas e engenheiros incorporem a sismicidade como um elemento central ao desenvolver estruturas metálicas.

Paralelamente, reforçou-se que a ductilidade das estruturas metálicas se denotou como elementar em sua capacidade de resistir a abalos sísmicos. Estruturas concebidas com elevada ductilidade demonstram uma capacidade superior de deformação controlada, o que, por conseguinte, reduz os danos durante terremotos e, de modo crucial, amplia a segurança das pessoas que as utilizam.

Diante disso, este trabalho contribui de maneira substancial para o acervo de conhecimento sobre a resposta das estruturas metálicas a abalos sísmicos, além de oferecer uma sólida base para estudos futuros e o desenvolvimento de projetos que proporcionem níveis superiores de segurança em regiões sujeitas a eventos sísmicos.

Adicionalmente, é sugerido que investigações subsequentes sigam a base desta pesquisa, acompanhando de perto a implementação prática do cumprimento das normas e das diversas modalidades de proteção contra abalos sísmicos em variados tipos de estruturas metálicas.

Neste sentido, a prática efetiva do rigoroso cumprimento das normas sismo-resistentes deve ser promovida e fiscalizada, garantindo que as estruturas metálicas projetadas e construídas estejam verdadeiramente preparadas para enfrentar o desafio representado pelos abalos sísmicos. Esse compromisso com a excelência na engenharia e com a segurança da sociedade é essencial para a construção de um futuro mais resiliente e protegido contra os efeitos dos terremotos.

REFERÊNCIAS

ALVES, Lorena da Silva. **Controle de vibrações em edifícios altos sujeitos a vento ou terremoto**. Goiânia, 2015.

ANDREY. **Placas Tectônicas Convergentes e Divergentes: O Que São e Suas Diferenças**. Mundo Ecologia. 09 de maio de 2019. Il. color. Disponível em: <https://www.mundoecologia.com.br/natureza/placas-tectonicas-convergentes-e-divergentes-o-que-sao-e-suas-diferencas/>. Acesso em: 07 de maio de 2022.

ARAI, Ana; SANTOS, Sergio Hampshire C.; LIMA, S. S. **Análise de um prédio residencial considerando normas sísmicas de diversos países**. In: VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, Brasil. 2014. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/>. Acesso em: 26 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15421: **projeto de estruturas resistentes a sismos - procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSUMPÇÃO, M. S., NETO, C. M. D. **“Sismicidade e estrutura interna da terra”**. In: TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. C. M., FAIRCHILD, T. R., TAIOLI, F. Decifrando a Terra - 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2000.

AZEVEDO, Letícia Medeiros de. **Estudo comparativo do detalhamento das armaduras em projetos de estruturas sismo-resistentes**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/>. Acesso em: 26 set. 2023.

BATELO, Everton André Pimentel. **Análise dinâmica avançada de estruturas de aço sob cargas extremas**. Ouro Preto, 2014. Dissertação—Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

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

FALCONI, R. A. **Espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar desempenho estructural em países Latinoamericanos**. In: XVII Seminário Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, 2003. Mendoza, Argentina.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira. **As principais Placas Tectônicas**. Mundo Educação. 07 de maio de 2022. Il. color. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/as-principais-placas-tectonicas.htm>. Acesso em: 07 de maio de 2022.

GARCÍA, Julián AsdrubalBuriticáet *al*. **Estabilidade dos Taludes de uma Barragem de Terra Homogênea Considerando Sismos**. Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 4, p. 2484-2493, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/>. Acesso em: 25 set. 2023.

GASPERIN, Rodrigo Pfeifer. **Análise estrutural de um condensador evaporativo sob influência de abalos sísmicos**. Caxias do Sul, 2014.

LOPES, Camilla Corrêa da Silva. **Estudo comparativo entre a norma brasileira NBR15421/2006 e a norma equatoriana NEC-SE-DS/2014 de ações e dimensionamentos sísmicos.** Belo Horizonte, 2017.

MENDES, P. **Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão sob excitação ambiente.** Tese de mestrado. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2005

MENDES, P. **Dinâmica de Estruturas.** Sebenta da unidade curricular Dinâmica de Estruturas. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012

MUÑOZ, LUIS FERNANDO PAULLO. **Análise Dinâmica Não Linear de Pórticos com Base Elasto-Plástica sob Ação Sísmica.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—PUC - RIO , Rio de Janeiro, 2015.

PARISENTI, R. **Estudo de análise dinâmica e métodos da NBR:15421 para projeto de edifícios submetidos a sismos.**2011.219f. Dissertação. PPGEC-UFSC. 2011.

PÉREZ PEÑA, Luis Alejandro. **Análise dos efeitos provocados por abalos sísmicos em estruturas irregulares.** 2012. xxviii, 166 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)—Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

RAO S. **Vibrações Mecânicas.** Prentice Hall, 4ª Edição, São Paulo, 2008.

ROSSATO, LucianaVellar. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados em estruturas submetidas a um processo estacionário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2017.

SANTOS S. H. C.; LIMA S. S. **Subsídios para uma futura normalização brasileira para resistência anti-sísmica das estruturas de concreto de edifícios.** Revista IBRACON de Estruturas, v.1, n.1, p. 47-62, set. 2005.

SANTOS S. H. C.; LIMA S. S.; SILVA, F. C. M. **Risco Sísmico na Região Nordeste do Brasil.** Revista IBRACON de Estruturas, v.3, n.3, p. 374-389, set. 2010.

VALDATI, J.; PELLERIN, JOEL. **Identificação e mapeamento de áreas de risco de inundação na planície aluvial da sub-bacia do Rio da Pedra - Jacinto Machado/SC.** III Simpósio Nacional de Geomorfologia, Anais do III Simpósio Nacional de Geomorfologia, Campinas, 2000.

WINCANDER. R.; MONROE, J. S. PETERS, K. **Fundamentos de Geologia.** Tradução e adaptação: CARNEIRO, M. A. São Paulo: Cengage Learning, 2009.