

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO ENGENHARIA CIVIL

MARCELO MINORO NISHIMURA NAKAMURA

**REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA: SOLUÇÕES ESTRUTURAIS
ANTISSÍSMICAS DESENVOLVIDAS ENTRE 2017 E 2021**

FLORIANÓPOLIS

2022

MARCELO MINORO NISHIMURA NAKAMURA

**REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA: SOLUÇÕES ESTRUTURAIS
ANTISSÍSMICAS DESENVOLVIDAS ENTRE 2017 E 2021**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Civil.
Orientador: Profa. Dra. Cristine do Nascimento Mutti

FLORIANÓPOLIS

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Nakamura, Marcelo Minoro Nishimura

Revisão integrativa da literatura: soluções estruturais
antissísmicas desenvolvidas entre 2017 e 2021 / Marcelo
Minoro Nishimura Nakamura ; orientadora, Cristine do
Nascimento Mutti, 2022.

115 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia sísmica. 3. Revisão
integrativa. 4. Terremotos. 5. Soluções estruturais. I.
Mutti, Cristine do Nascimento. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

MARCELO MINORO NISHIMURA NAKAMURA

**REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA: SOLUÇÕES ESTRUTURAIS
ANTISSÍSMICAS DESENVOLVIDAS ENTRE 2017 E 2021**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil.

Florianópolis, 10 de Março de 2022.

Prof.(a) Liane Ramos da Silva, Dr^a
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.(a) Cristine do Nascimento Mutti, Ph.D
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Eduardo Lobo, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Gabriel Gutjahr Stolf
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos pais, minha família e meus amigos.
Todos eles contribuíram para minha caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso representa a finalização de um ciclo muito importante em minha vida, e que contou com a participação direta e indireta de várias pessoas importantes, dentre as quais agradeço:

Aos meus pais, Luzia e Antônio, que me ensinaram valores de gratidão e respeito que me moldam como pessoa e cidadão e por acreditarem em minhas escolhas e fazerem de tudo para que eu pudesse realizar meus sonhos.

Aos meus irmãos, Katiúscia e Júnior, pelo suporte emocional e conforto em momentos em família, e por compreenderem minha ausência enquanto eu realizava o curso em Florianópolis.

Aos meus amigos de curso e faculdade que tornaram a vivência da universidade muito mais alegre: Bárbara, Thayná, Rafaela, Paulo, Pâmela, Brunella, André, Daniela, Júlia, Shaiane, Caio, Henrique, Bruna.

À minhas amigas que fiz durante a experiência do intercâmbio, Jaqueline, Sarah e Mayra, pelo suporte emocional, momentos de diversão e aprendizado pessoal nessa etapa final de curso.

À minha Orientadora Ph.D. Cristine Mutti, por me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho por meio das conversas e orientações.

Ao Eng. Gabriel Stolf e Prof. Dr. Eduardo Lobo por aceitarem o convite para compor a banca avaliadora do trabalho de conclusão de curso.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de estudo em uma universidade de comprometimento sério com a ciência e para com a sociedade brasileira.

Forma é conteúdo sócio-histórico decantado. (ADORNO, 2003)

RESUMO

A crescente urbanização em diferentes regiões do planeta transformou pequenos vilarejos em grandes e complexos centros urbanos, que apresenta, portanto, uma demanda da construção de edifícios e infraestrutura necessárias para atender esse processo. A partir deste cenário, sabe-se que a ocupação humana também ocorre em algumas regiões mais vulneráveis à ocorrência de desastres naturais muito danosos às populações humanas como os terremotos, por exemplo. Ao longo da história, muitas construções não resistiram aos efeitos desses eventos por fatores técnicos (tipologia estrutural, práticas, materiais, sistemas de construção existentes), econômicos (investimentos, infraestrutura, materiais) e/ou culturais (organização social e políticas institucionais) e provocaram perdas significativas de vidas. O terremoto mais mortal registrado provocou a morte de mais de 800.000 pessoas na China Central, no ano de 1556 na província de Xiangxi. Nesse contexto, a Engenharia sísmica surge como um ramo da ciência dedicada a investigação dos fatores que provocam sismos, na materialização de soluções técnicas e normas para estruturas mais seguras. Por se manifestarem como eventos naturais, os terremotos não podem ser controlados, mas a avaliação desses fenômenos auxilia na mitigação dos danos causados às construções. Neste trabalho, uma revisão integrativa da literatura foi realizada com objetivo de apresentar as principais soluções antissísmicas desenvolvidas internacionalmente no período entre 2017 e 2021 (5 anos). Foi possível observar a contribuição de estudos para soluções ativas e passivas, *retrofitting* e estudo de caso de construções históricas. Ademais, as principais contribuições do estudo revelam a distribuição geográfica dos resultados, evidenciando onde ocorre maior produção científica acerca da engenharia sísmica; as tipologias estruturais como estrutura-alvo das soluções; as publicações mais relevantes do período etc. A realização deste trabalho permitiu ao autor o desenvolvimento de uma ferramenta de análise dinâmica que auxilia na organização dos resultados de revisões sistemáticas e integrativas de literatura por meio do *software* digital Power BI, da Microsoft®. Por fim, destaca-se a importância de olhar o papel da engenharia sísmica não somente de forma preventiva, como também com os objetivos de suprir as necessidades imediatas pós-terremoto e a reconstrução de comunidades a longo prazo.

Palavras-chave: Engenharia Sísmica. Revisão integrativa. Terremotos. Soluções estruturais.

ABSTRACT

The growing urbanization in different regions of the planet has transformed small villages into large and complex urban centers. There is a demand for the construction of buildings and infrastructure necessary to meet this process. From this scenario, it is known that human occupation also occurs in some regions that are more vulnerable to the occurrence of natural disasters that are very harmful to human populations such as earthquakes, for example. Throughout history, many buildings have not resisted the effects of these events due to technical factors (structural typology, practices, materials, existing building systems), economic factors (investments, infrastructure, materials) and/or cultural factors (social organization and institutional policies) and caused significant loss of human life. The deadliest earthquake on record killed more than 800,000 people in Central China in the year 1556 in Xiangxi Province. In this context, seismic engineering emerges as a branch of science dedicated to the investigation of the factors that cause earthquakes, in the materialization of technical solutions and standards for safer structures. As they manifest as natural events, earthquakes cannot be controlled, but the evaluation of these phenomena helps to mitigate the damage caused to buildings. In this work, an integrative literature review was carried out in order to present the main anti-seismic solutions developed internationally in the period between 2017 and 2021 (5 years). It was possible to observe the contribution of studies for active and passive solutions, retrofitting and case study of historical constructions. Furthermore, the main contributions of the study reveal the geographical distribution of the results, showing where there is greater scientific production on seismic engineering; the structural typologies as the target structure of the solutions; the most relevant publications of the period, etc. The completion of this work allowed the author to develop a dynamic analysis tool that helps in the organization of the results of systematic and integrative literature reviews through the digital software Power BI, from Microsoft®. Finally, it highlights the importance of looking at the role of seismic engineering not only in a preventive way, but also with the objective of meeting the immediate post-earthquake needs and the long-term reconstruction of communities.

Keywords: Seismic Engineering. Integrative review. Earthquakes. Structural solutions.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura interna da terra | 23 |
| Figura 2 - Constituição da Núcleo e Manto | 23 |
| Figura 3 - Litosfera e Astenosfera..... | 24 |
| Figura 4 - Transição do formato dos Continentes | 25 |
| Figura 5 - Distribuição geográfica dos fósseis animais e vegetais..... | 26 |
| Figura 6 - Segmentação da Crosta por placas tectônicas | 28 |
| Figura 7 - Dinâmica do mecanismo de convecção..... | 28 |
| Figura 8 - Placas Tectônicas..... | 29 |
| Figura 9 - Mapa de registro de terremotos | 30 |
| Figura 10 - Falhas entre placas tectônicas..... | 31 |
| Figura 11 - Formação de limites divergentes | 32 |
| Figura 12 - Limites convergentes Oceano-Oceano e Oceano-Continente | 33 |
| Figura 13 - Limite convergente Continente-Continente..... | 33 |
| Figura 14 - Falhas Geológicas..... | 34 |
| Figura 15 - Ondas sísmicas P, S, Rayleigh e Love..... | 36 |
| Figura 16 - Hipocentro e Epicentro..... | 37 |
| Figura 17 - Escala de magnitude e amplitude de terremotos | 38 |
| Figura 18 - Sistemas resistentes a esforços laterais..... | 47 |
| Figura 19 - Método SSF..... | 52 |
| Figura 20 - Planilha com dados bibliométricos extraídos da Scopus..... | 58 |
| Figura 21 - Planilha manipulada pela seleção de dados | 59 |
| Figura 22 - Relatório de Análise da Pesquisa página 1 | 60 |
| Figura 23 - Relatório de Análise da Pesquisa página 2..... | 60 |
| Figura 24 - Relatório de Análise da Pesquisa página 3..... | 61 |
| Figura 25 - Seção 'Página inicial' MS Power BI | 61 |
| Figura 26 - Distribuição geográfica e quantitativa dos resultados | 66 |
| Figura 27 - Global Seismic Hazard Map..... | 67 |
| Figura 28 - Evolução da produção científica nos países entre 2007 e 2017 | 68 |
| Figura 29 - Top 10 publicações com maior número de citações..... | 69 |
| Figura 30 - Fontes de publicação dos resultados..... | 71 |
| Figura 31 - Isoladores sísmicos | 73 |
| Figura 32 - isoladores de base por hidromagnéticos deslizantes..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 - Sistema de isolamento de piso RTB | 76 |
| Figura 34 - Bloco de construção RTB | 76 |
| Figura 35 - amortecedor de chapa de aço e duas barras de liga com memória | 80 |
| Figura 36 - corpos de prova com placas de chumbo (CL) | 82 |
| Figura 37 – Proporções de compósito cimentício e concreto convencional | 84 |
| Figura 38 - Paredes de concreto armado com acoplamento de vigas..... | 87 |
| Figura 39 - Junta de dilatação para sistemas de paredes-laje de concreto armado | 88 |
| Figura 40 - etapas de construção do sistema de Paredes-laje | 89 |
| Figura 41 - Representação da ERPCJ..... | 91 |
| Figura 42 - Pagoda de madeira Yingxian | 92 |
| Figura 43 - Seção transversal do Pagoda de Yingxian | 93 |
| Figura 44 - Dougong | 94 |
| Figura 45 - Registros de terremotos na região de Xingyian..... | 95 |
| Figura 46 - modelo estrutural do Pagoda de Yingxian..... | 95 |
| Figura 47 - conexão espiga e encaixe, Pagoda Yingxian | 96 |
| Figura 48 - Mecanismo de transferência de esforços entre pilares e fundação | 96 |
| Figura 49 - Mecanismos de dissipação de energia de uma junta dougong | 97 |
| Figura 50 - residências de alvenaria em adobe, México | 99 |
| Figura 51 - Reforço de arame em moradias de adobe..... | 99 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Tentativas da Busca inicial de resultados | 55 |
|--|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Terremotos notáveis entre 1990 e 2009 | 41 |
| Tabela 2 - Terremotos históricos da Antiguidade a Idade Moderna | 41 |
| Tabela 3 - Terremotos notáveis do século 20..... | 43 |
| Tabela 4 - Resultados categorizados na solução Isoladores Sísmicos | 71 |
| Tabela 5 - Resultados categorizados na solução DDE..... | 78 |
| Tabela 6 - Resultados categorizados na solução Materiais Alternativos | 82 |
| Tabela 7 - Resultados categorizados na solução Peças & Conexões estruturais..... | 85 |
| Tabela 8 - Resultados categorizados na solução Construções históricas | 91 |
| Tabela 9 - Resultados categorizados na solução <i>Retrofit</i> | 98 |
| Tabela 10 - Danos em áreas com edifícios de alvenaria de adobe | 99 |
| Tabela 11 - Resultados da Revisão Integrativa de Literatura..... | 112 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI – American Concrete Institute
ADAS – Advanced Driver Assistance Systems
AFA – Amortecedores de Fenda de Aço
CNN – Cable News Network
DEDD – Dispositivo Externo de Dissipação de Energia
ERPCJ - Earthquake-Resilient Prefabricated Cross Joint
FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FCP – Flange Cover Plate
FRP – Fibre Reinforced Polymers
FHWA – Federal Highway Administration
GEM – Global Earthquake Model Foundation
HPFRCC - High-performance fiber-reinforced cementitious composites
IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto
ICE – Institute of Civil Engineers
KNTU - Khajeh Nasir al-Din Toosi University of Technology
LCC – Life Cycle Cost
LFERS – Lateral Force Resisting Systems
MR – Magneto Reológicos
MS – Microsoft
NBR – Norma Brasileira
ONU – Organização das Nações Unidas
PGA – Peak Ground Acceleration
RR-FRBs – Recycled Rubber Fibber Reinforced Bearings
RTB – Recycled Tire Bearing
SHCC – Strain Hardening Cementitious Composite
SMA – Shape Memory Alloy
SPPT – Segmental Precast Posttensioned
SSF – Systematic Search Flow

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 18 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 18 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 18 |
| 1.2 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 19 |
| 1.3 | DELIMITAÇÃO E LIMITAÇÕES | 20 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 2.1 | Engenharia sísmica | 21 |
| 2.2 | Sismologia | 21 |
| 2.2.1 | Estrutura interna da Terra | 22 |
| 2.2.2 | Deriva continental..... | 24 |
| 2.2.3 | A teoria da tectônica global | 27 |
| 2.2.4 | Placas tectônicas | 29 |
| 2.2.5 | Limites de placas tectônicas | 31 |
| 2.2.6 | Falhas | 33 |
| 2.2.7 | Teoria do rebote elástico..... | 34 |
| 2.2.8 | Ondas sísmicas..... | 35 |
| 2.2.9 | Hipocentro e epicentro..... | 36 |
| 2.2.10 | Magnitude de terremotos | 37 |
| 2.3 | Terremotos | 39 |
| 2.3.1 | Terremotos históricos | 40 |
| 2.4 | Danos sísmicos às construções | 44 |
| 2.4.1 | Efeito da ressonância em edifícios | 45 |
| 2.5 | Sistemas antissísmicos..... | 46 |
| 2.5.1 | Controle passivo | 49 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.2 | Controle ativo | 49 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 50 |
| 3.1 | Tipos de revisão da literatura e busca sistemática | 50 |
| 3.2 | Estrutura do método..... | 51 |
| 3.2.1 | Estratégia de busca | 52 |
| 3.2.2 | Análise dos documentos | 57 |
| 3.2.2.1 | <i>Painel de indicadores como ferramenta de análise dos dados</i> | <i>57</i> |
| 3.2.3 | Síntese..... | 62 |
| 3.2.4 | Redação dos resultados..... | 62 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 63 |
| 4.1 | Visão geral da pesquisa | 63 |
| 4.2 | Caracterização da pesquisa | 63 |
| 4.3 | SOLUÇÕES ENCONTRADAS..... | 71 |
| 4.3.1 | Isoladores sísmicos | 71 |
| 4.3.1.1 | <i>Isoladores de base por rolamentos hidromagnéticos deslizantes</i> | <i>73</i> |
| 4.3.1.2 | <i>Isolamento sísmico de piso usando pneus reciclados para edifícios essenciais em países em desenvolvimento.....</i> | <i>75</i> |
| 4.3.1.3 | <i>Rolamentos reforçados com fibra de borracha reciclada (RR-FRBs) como isoladores de base para edifícios residenciais em países em desenvolvimento: O edifício de demonstração de Pasir Badak, Indonésia</i> | <i>77</i> |
| 4.3.2 | Dispositivos de Dissipação de Energia..... | 78 |
| 4.3.2.1 | <i>Amortecedores com materiais metálicos de memória de forma.....</i> | <i>79</i> |
| 4.3.2.2 | <i>Dispositivos de Dissipação de Energia Inovadores</i> | <i>80</i> |
| 4.3.3 | Materiais alternativos..... | 82 |
| 4.3.3.1 | <i>Aplicação de Polímeros para reforço em elementos estruturais.....</i> | <i>82</i> |
| 4.3.3.2 | <i>Compósitos cimentícios</i> | <i>84</i> |
| 4.3.4 | Peças e conexões estruturais | 85 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3.4.1 | <i>Estudo de transferência de carga de conexão vigas de aço com paredes de concreto armado</i> | 86 |
| 4.3.4.2 | <i>Novo tipo de junta entre lajes de paredes compostas por aço leve e concreto esponjoso</i> | 87 |
| 4.3.4.3 | <i>Testes de carregamento cíclico de junta cruzada pré-fabricada resiliente a terremotos com placa de cobertura de flange única</i> | 89 |
| 4.3.5 | Construções históricas | 91 |
| 4.3.5.1 | <i>Solucionando o mistério do Pagoda chinês de mais de mil anos</i> | 92 |
| 4.3.6 | Retrofit | 98 |
| 4.3.6.1 | <i>Residências em Adobe reforçadas com arames de aço para proteção sísmica</i> | 98 |
| 5 | CONCLUSÃO | 101 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 101 |
| 5.2 | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 102 |
| | REFERÊNCIAS | 104 |
| | APÊNDICE A – 48 artigos utilizados para a revisão de literatura | 112 |

1 INTRODUÇÃO

Terremotos são vibrações ou movimentos repentinos causados pela liberação brusca e rápida de energia acumulada pela deformação da Litosfera e que se propagam em ondas sísmicas. Em razão de ser um fenômeno decorrente da liberação de energia acumulada, ele é considerado transitório. Essas propagações de energia liberadas na crosta terrestre provocam danos substanciais à sociedade humana, que pode afetar de forma direta e indireta. Diretamente, os terremotos afetam vidas humanas (mortos e feridos), realiza a destruição de moradias, edifícios públicos e industriais. Os impactos indiretos causados por esses fenômenos são deslizamentos de terra, inundações, surgimento ou intensificação de pandemias, tsunamis e danos econômicos a uma região (SÁNCHEZ, 1994).

A ocorrência de terremotos provoca uma adaptação humana frente a esses eventos contra possíveis recorrências. Na Califórnia, a região sul foi assolada por 3 grandes terremotos de alta intensidade num curto período: San Francisco (1906), Long Beach (1933) e San Fernando (1971). Diante desse cenário, uma nova forma de se projetar e construir edifícios tomava forma não somente para os Estados Unidos, mas para o mundo também, principalmente na concepção de edifícios cívicos, edifícios elevados, hospitais e escolas. A construção da época não levava em consideração os esforços horizontais nas edificações. Em decorrência disso, as consequências dos terremotos eram muito severas não somente pelos tremores em si, mas devido à alta fragilidade das construções, que entravam em colapso com facilidade (BOLT, 1981).

Segundo dados do Escritório das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres, as vítimas fatais devido a terremotos e tsunamis já ultrapassam o número de 250.000 pessoas nos últimos anos, principalmente em regiões que são banhadas pelos Oceanos Índico e Pacífico. Além disso, os danos econômicos somam o valor de 280 bilhões de dólares causados por esses desastres. Existe, portanto, uma necessidade de investir em prevenção e maior preparo da humanidade contra esses eventos por meio de desenvolvimento da ciência e tecnologia (ONU, 2018).

Um dos terremotos que causou um número expressivo de vítimas humanas ocorreu em 2010, no Haiti, país caribenho situado na América Central. O tremor e todos os seus impactos provocou a morte de mais de 200.000 pessoas, e intensificou o lento processo de desenvolvimento na região, que sofre de uma forte crise política, baixos índices de

desenvolvimento humano e que sofreu recentemente, em 2021, um terremoto de magnitude similar ao do passado (CNN, 2021).

O Chile é um país situado numa zona de convergência de placas tectônicas (Nazca e Sul-Americana) e, logo, apresenta alto potencial de ocorrência de terremotos. O tremor de maior magnitude registrado na história aconteceu na cidade de Valdivia, em 1960, provocando a morte de 2000 pessoas e 2 milhões de feridos. Além dos impactos sentidos no continente, outros países também puderam sentir as ondas sísmicas como Filipinas, Estados Unidos e Japão (BBC, 2017).

O Brasil está situado na região central da placa tectônica Sul-Americana e, portanto, sofre de vibrações de intensidade baixa. No entanto, já foram registrados tremores significativos em solos brasileiros. Em 1955, em Mato Grosso, um terremoto de 6,6 graus na escala Richter foi registrado numa região de poucos habitantes, sem ocasionar danos materiais e vítimas; no mesmo ano, outro terremoto foi sentido na cidade de Vitória no Espírito Santo de 6,3 graus que felizmente provocou apenas susto e vibração de algumas residências. Em função de alguns eventos recentes também, foi criado em 2006, a norma NBR 15421 – Projetos de Estruturas Resistente à Sismos, que define alguns requisitos para estruturas civis, a redução de danos esperados em edificações e a manutenção dos requisitos de desempenho após a ocorrência dos eventos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar as principais soluções antissísmicas que foram desenvolvidas ao redor do mundo e são empregadas para a prevenção contra sismos nos últimos cinco anos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. Apresentar e discutir as principais estratégias contra sismos e as regiões do Mundo que estão desenvolvendo-as.

- b. Comparar os principais resultados e analisar as principais tipologias estruturais alvo das soluções encontradas.
- c. Desenvolver uma ferramenta de análise para revisões integrativas e sistemáticas de literatura.
- d. Identificar as principais limitações, a importância e os aspectos que influenciam nos estudos sobre as principais soluções antissísmicas nos últimos cinco anos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Trabalho será estruturado em cinco partes principais: Introdução; Metodologia; Revisão Bibliográfica; Resultados e Discussões; e Conclusão. A primeira parte é a Introdução, que permite que o leitor tenha um contato inicial com o contexto sobre o tema que será discutido e compreenda a sua justificativa, seu objetivo geral e objetivos específicos e a estrutura do trabalho.

Na segunda parte, é apresentado o Método de investigação científica utilizado para a realização da revisão da literatura, bem como suas etapas, seus principais dados de entrada e dados de saída.

No capítulo 3, intitulado Revisão Bibliográfica, serão apresentados conceitos importantes para o embasamento teórico da pesquisa a partir de trabalhos já realizados sobre o tema.

Na etapa de Resultados e Discussões serão apresentados os principais dados de saída obtidos por meio do método de revisão sistemática de literatura. Com os dados, serão feitas análises, comparações e investigação dos principais artigos científicos que exploram as soluções estruturais contra sismos que são utilizadas ao redor do mundo e essas informações devem responder os principais questionamentos desse trabalho, ou seja, seus objetivos específicos.

Na etapa de Conclusão, será apresentado o desfecho do trabalho por meio da verificação do trabalho quanto ao cumprimento dos objetivos de pesquisa. A conclusão é uma etapa assertiva e concisa e traduz a profundidade que o trabalho conseguiu atingir; avalia o método utilizado e suas limitações; sugestões de trabalhos futuros e melhorias.

1.3 DELIMITAÇÃO E LIMITAÇÕES

A delimitação do trabalho foi essencial para garantir a sua execução no prazo estabelecido e levando-se em conta os recursos disponíveis. Este trabalho delimitou-se pela busca de documentos publicados na base de dados científicos revisados por pares Scopus® entre o período de 2017 e 2021 e pelos idiomas familiares ao autor, como o português, inglês e espanhol. A data da pesquisa e os filtros aplicados na busca estão discretizados no capítulo 3. Portanto, em uma situação em que se pretenda realizar a uma investigação deste trabalho sob distintos filtros, base de dados ou período de investigação, os resultados encontrados consequentemente podem ser diferentes. Análises numéricas e avaliações experimentais sobre as soluções antissísmicas não fazem parte do escopo deste trabalho. Ademais, não faz parte do escopo informações relativas a custos para implementação das soluções antissísmicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENGENHARIA SÍSMICA

Prochazkova (2011) conceitua engenharia sísmica como a disciplina cujo objetivo é construir infraestruturas e edifícios resistentes aos impactos sísmicos e fenômenos semelhantes e, desta forma, proteger a saúde, vidas e propriedades humanas. O departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Stanford (2022) define engenharia sísmica como um processo multifásico que vai desde a descrição das fontes sísmicas à caracterização dos efeitos do local, da resposta estrutural e das medidas de proteção sísmica. As atividades desenvolvidas nesse campo de estudos incluem modelagem de ocorrência, modelagem geofísica, modelagem de movimento do solo, análise dinâmica estocástica e não linear, projeto e experimentação. Os componentes desses estudos dizem respeito às fases individuais, mas também, e talvez mais importante, a aspectos que incorporam algumas ou todas as fases da engenharia sísmica (STANFORD, 2022).

Segundo Gioncu e Mazzolani (2011), a Engenharia Sísmica, tendo como tarefa resolver a análise de estruturas sob ações sísmicas, é um ramo do campo mais geral da Ciência da Engenharia Estrutural. Esse campo de estudos deve desenvolver metodologias específicas para analisar os efeitos das ações sísmicas em estruturas, muito diferentes daquelas usadas em caso de outras ações, como permanentes, cargas acidentais, vento, neve, entre outros fenômenos (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

2.2 SISMOLOGIA

Jangid (2013) reforça que o estudo de engenharia de terremotos exige uma boa compreensão do processo geofísico que causa terremotos e vários efeitos de terremotos. Sismologia é o estudo da geração, propagação e medição de ondas sísmicas através da terra e as fontes que as geram. A palavra sismologia originou-se das palavras gregas “*seismos*” que significa terremoto e “*logos*” que significa ciência. O estudo da propagação de ondas sísmicas através da terra fornece o máximo de informações para a compreensão da estrutura interna da terra (JANGID, 2013).

A ciência da Sismologia está envolvida com o estudo dos movimentos de placas tectônicas associados a terremotos importantes. Os sismólogos, como são chamados os

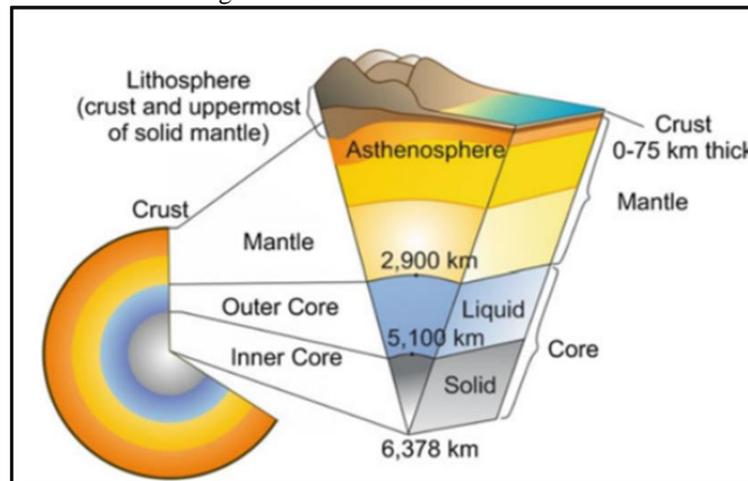
profissionais dessa área de estudo, são especializados em geofísica e se dedicam a analisar a gênese e propagação de ondas sísmicas em materiais geológicos. Alguns deles estudam a relação entre falhas, tensão e sismicidade, outros interpretam os mecanismos de ruptura de dados de ondas sísmicas, outros integram informações geocientíficas para definir zonas de sismicidade e, finalmente, outros colaboram com engenheiros com o objetivo de minimizar os danos causados às construções (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

2.2.1 Estrutura interna da Terra

A estrutura interna da Terra é um dos parâmetros-chave para entender as atividades sísmicas em todo o mundo. A estrutura interna da Terra pode ser composta por três camadas concêntricas (Figura 1): a parte mais interna da Terra é o núcleo e é composto principalmente de ferro; o núcleo tem duas partes separadas: o núcleo interno e externo (SUCUOGLU; AKKAR, 2014). O núcleo interno é sólido e o núcleo externo é líquido; o manto está entre a crosta (camada mais externa da Terra) e o núcleo. O núcleo é composto de ferro fundido, provavelmente misturado com pequenas quantidades de outros elementos como níquel e enxofre ou silício. O núcleo sólido interno é um material de níquel-ferro muito denso e está sujeito a pressões muito altas e sua temperatura máxima no núcleo é estimada em cerca de 3000 graus Celsius (JANGID, 2013). As mudanças abruptas na velocidade de propagação das ondas sísmicas (Figura 2) diferenciam o manto, o núcleo externo e o núcleo interno (SUCUOGLU; AKKAR, 2014).

O Manto é uma camada de 2900 km de espessura e é formado pelo Manto Superior e o Manto inferior. O Manto superior atinge uma profundidade de aproximadamente 400 km e é composto essencialmente por olivinas - minerais forsterita e (Mg_2SiO_4) e fayalita (Fe_2SiO_4) – e piroxênios – cadeias simples de tetraedros de sílica – enquanto o Manto inferior é composto de uma massa mais homogênea de Magnésio, óxido de ferro e quartzo. O manto apresenta uma temperatura inferior ao Núcleo, de 2200 graus Celsius e o material se encontra no estado semi-fundido viscoso. O manto age como fluido em resposta a tensões de ação lenta e rasteja sob cargas lentas, mas ele se comporta como sólido na presença de tensões de ação rápida, como, por exemplo, em situações causadas por terremotos (JANGID, 2013).

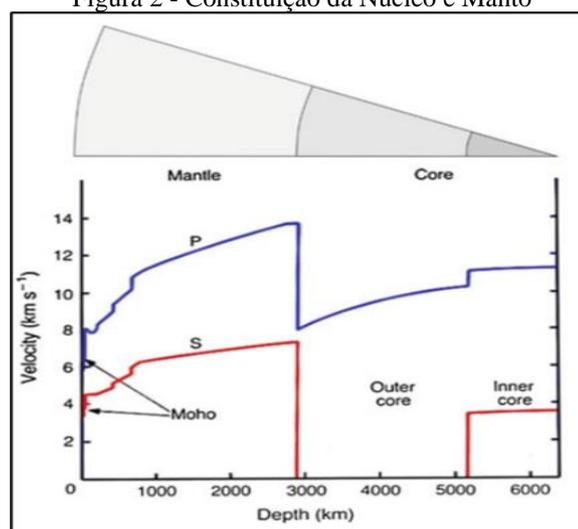
Figura 1 - Estrutura interna da terra



Fonte: Sucuoglu e Akkar (2014)

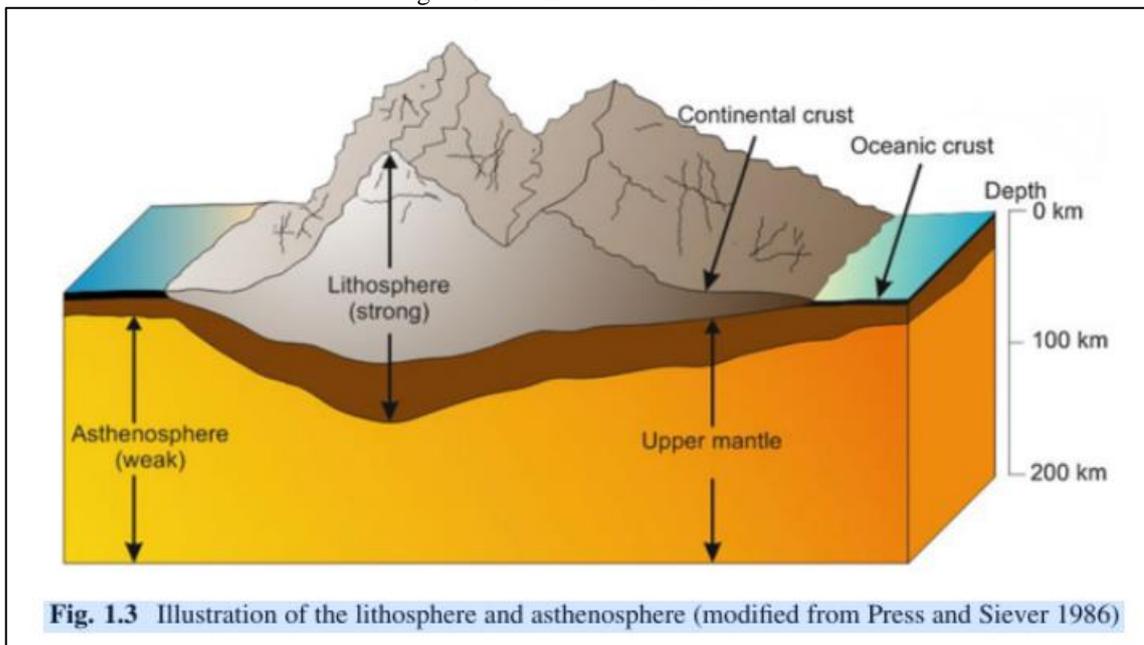
A variação repentina na velocidade da onda sísmica perto da superfície cristalina é devido à descontinuidade de Moho, e é aceito como o limite entre o manto e a crosta. A espessura da crosta é de aproximadamente 7 km sob os oceanos, sua espessura média é de 30 km sob os continentes e atinge ainda mais espessura valores sob as serras. A crosta tem estrutura basáltica sob os oceanos, enquanto é composto principalmente de basalto e granito sob os continentes, já a litosfera e a astenosfera são os dois limites mais externos da Terra que são definidos em termos de resistência e rigidez do material (Figura 3), (SUCUOGLU; AKKAR, 2014).

Figura 2 - Constituição da Núcleo e Manto



Fonte: Sucuoglu e Akkar (2014)

Figura 3 - Litosfera e Astenosfera



Fonte: Press e Siever (1986)

A litosfera é rígida e relativamente forte, formada principalmente pela crosta e a parte mais externa do manto. A espessura da litosfera é aproximadamente 125 km ao longo que a astenosfera fica abaixo da litosfera e forma principalmente a parte fraca do manto (uma camada mais macia) que pode se deformar por fluência. A fonte de calor é a radioatividade dentro do núcleo (SUCUOGLU; AKKAR, 2014).

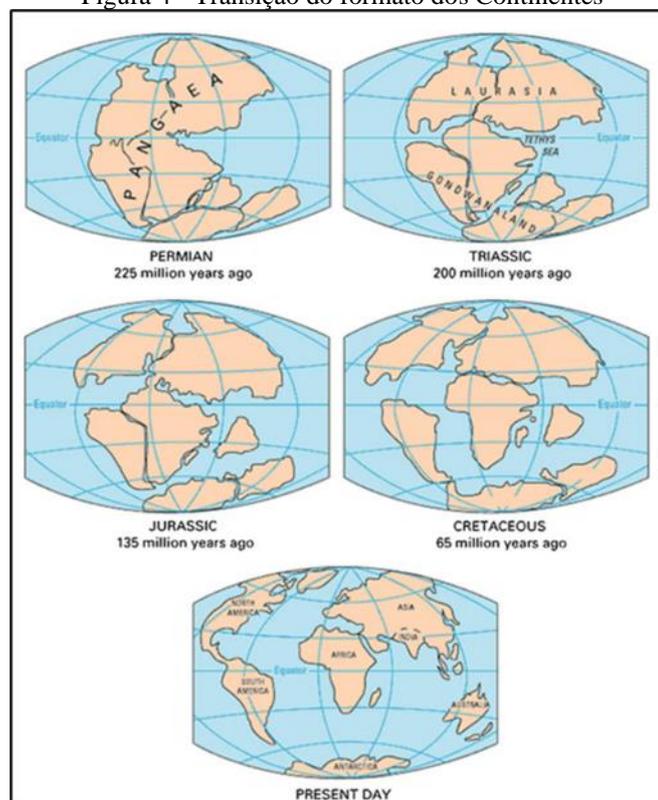
Dessa forma, Gioncu e Mazzolani (2011) descrevem a Terra como um corpo vivo em movimento permanente. Este movimento é produzido pelas correntes de convecção desenvolvido no manto viscoso devido à alta temperatura e gradientes de pressão entre a crosta e o núcleo. Essas correntes de convecção resultam em uma circulação das massas terrestres: sai lava quente derretida e enquanto a massa de rocha fria desce para a Terra (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

2.2.2 Deriva continental

O cientista alemão Alfred Wegener, em 1915, propôs a hipótese de que os continentes formavam uma única massa de terra antes de se separarem e derivarem para suas localizações atuais. Suas observações foram baseadas na similaridade de litorais e geologia entre a América do Sul, África e Península Indígena, Austrália e Antártica (Figura 4). Ele propôs que um grande continente chamado Pangéia existia na Terra há cerca de 200 milhões de anos e era cercado por

um oceano chamado Panthalassa (JANGID, 2013). Postulou-se que este supercontinente se partiu em vários pedaços que formaram os atuais continentes. Este continente se desfez, inicialmente, formando dois continentes, Laurásia e Gondwanaland, cerca de 200 milhões de anos atrás. Há 135 milhões de anos, a Laurásia havia se dividido nos continentes da América do Norte e Eurásia, e Gondwanaland tinha dividido nos continentes da Índia, América do Sul, África, Antártica e Austrália (SUCUOGLU; AKKAR, 2014). Esses continentes continuaram mover e chegaram à sua configuração atual, incluindo a colisão da Índia, com a Eurásia cerca de 50 milhões de anos atrás.

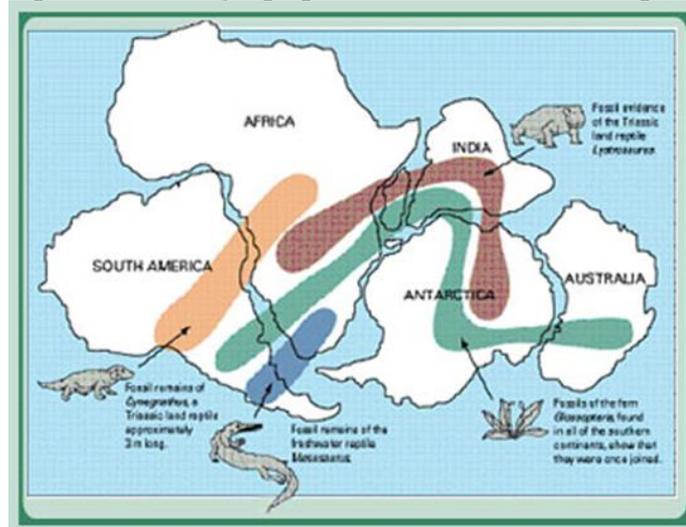
Figura 4 - Transição do formato dos Continentes



Fonte: Sucuoglu e Akkar (2014)

Essas peças foram posteriormente desviadas para sua posição atual. Embora ele tenha apresentado muitas evidências para a deriva continental, ele foi incapaz de fornecer uma explicação convincente para os processos físicos que podem ter causado essa deriva. Ele sugeriu que os continentes haviam sido separados pela pseudoforça centrífuga da rotação da Terra ou por um pequeno componente da precessão astronômica. Mas os cálculos mostraram que essas forças não foram suficientes para causar a deriva continental (JANGID, 2013).

Figura 5 - Distribuição geográfica dos fósseis animais e vegetais



Fonte: Jangid (2013)

Vários continentes mostram evidências de correspondência de sequências geológicas com rochas de idade, tipo, formação e estrutura semelhantes ocorrendo em diferentes países. Chandradhara (2018) argumenta que há um notável encaixe de quebra-cabeças entre muitos continentes - por exemplo, entre a costa leste da América do Sul e a costa oeste da África - o que sugere que os continentes já foram reunidos. Ademais, vários fósseis idênticos foram encontrados distribuídos pelos continentes meridionais. Fósseis do *Mesosaurus* (gênero extinto de pararápteis marinhos) que datam de 280 milhões de anos atrás são encontrados na América do Sul e África. Fósseis Vegetais, como *Glossopteris* (gênero da extinta ordem de samambaias com sementes conhecidas) foram encontrados no sul América, África, Índia e Austrália (Figura 5). Sabe-se hoje que vários continentes mostram evidências de correspondência de sequências geológicas com rochas de idade, tipo, formação e estrutura semelhantes ocorrendo em diferentes países. Uma série de anomalias climáticas foram descobertas que sugerem que os continentes já devem ter estado numa posição diferente e, portanto, experimentaram um clima diferente (CHANDRADHARA, 2018). O instituto de Geociências da Universidade em São Paulo revelou em pesquisa realizada em 2011 que houve glaciação no Nordeste brasileiro há 300 milhões de anos atrás; o estudo identificou marcas de erosão produzidas pela passagem de geleiras sobre substrato rochoso mais antigo, deslocamento de icebergs que formaram sulcos e deslocamentos de icebergs sobre fundos de lagos e mares (IGC, 2011).

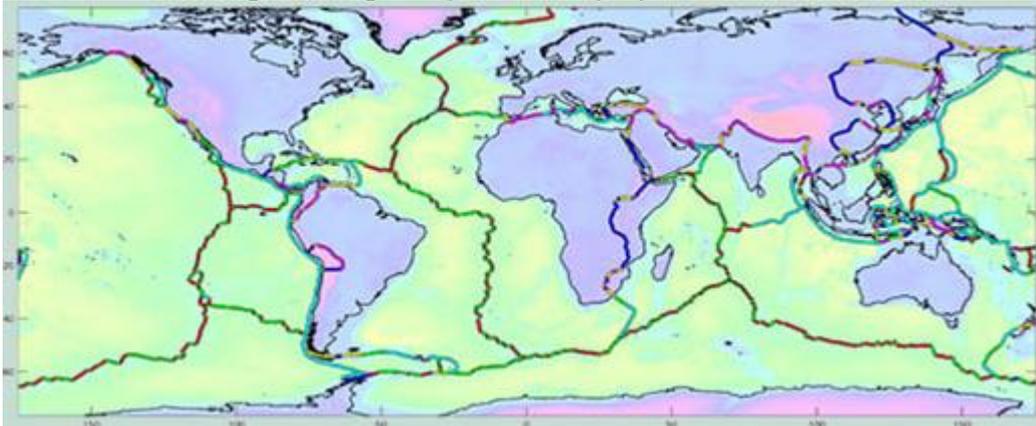
Os geólogos clássicos contestaram por muito tempo a Teoria da Deriva Continental, segundo Gioncu e Mazzolani (2011). Mas a nova hipótese do início dos anos 1960 explicou vários conjuntos intrigantes de observações: a teoria foi confirmada após o exame de águas

profundas expedições às dorsais meso-oceânicas realizadas por Maurice Ewing. Em 1961 Hess e Dietz desenvolveram a Teoria da Expansão do Solo Oceânico. As cordilheiras oceânicas, onde o magma é constantemente extrudado para o fundo do oceano, afasta as placas. Portanto, a convecção do manto impulsiona os movimentos das placas. A zona onde este processo ocorre é referido como uma dorsal meso-oceânica; a mais conhecida é a Dorsal Meso-Atlântica, onde as placas continentais da Eurásia e da América do Norte se afastam a uma taxa de cerca de 2,5 centímetros por ano. Em 1967 Jason Morgan propôs que a superfície da Terra consiste em 12 placas rígidas que se movem em relação uns aos outros. No mesmo ano, Xavier Le Pichon publicou uma síntese mostrando a localização e tipo de limites de placa, bem como sua direção de movimento. Essas descobertas no período 1966-1970 levaram ao desenvolvimento da teoria científica da Placas Tectônicas, que foi a hipótese básica durante mais de 50 anos; numerosos métodos testaram essa teoria e atualmente existe um consenso maior entre estudiosos da Sismologia (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

2.2.3 A teoria da tectônica global

A teoria das placas tectônicas, apresentada no início da década de 1960, explica que a litosfera é dividida em segmentos grandes chamados placas, conforme mostrado na Figura 6. A parte superior da terra é considerada dividida em duas camadas com diferentes propriedades de deformação: camada rígida superior, chamada litosfera, tem cerca de 100 km de espessura abaixo dos continentes e cerca de 50 km sob os oceanos, e consiste em crosta e rochas rígidas do manto superior. A camada inferior, chamada astenosfera, estende-se até cerca de 700 km de profundidade. A casca litosférica rígida é quebrada em várias placas principais de formato irregular e muitas placas secundárias. As placas litosféricas não são estacionárias, pelo contrário, elas flutuam em um padrão complexo, com uma velocidade de cerca de 2 a 10 cm/ano nas rochas moles da astenosfera (JANGID, 2013).

Figura 6 - Segmentação da Crosta por placas tectônicas



Fonte: Jangid (2013)

Segundo Jangid (2013), esta teoria requer uma fonte de energia que pode gerar uma tremenda força agindo sobre as placas. A explicação amplamente aceita é baseada na força oferecida pelas correntes de convecção criadas pelo comportamento termomecânico do subsolo da Terra. A variação da densidade do manto com a temperatura produz um equilíbrio instável, no qual a camada superior mais fria e mais densa afunda sob a ação da gravidade para a camada inferior mais quente, que é menos densa. O material menos denso sobe e o material mais frio, à medida que afunda, aquece e torna-se menos denso. Essas correntes de convecção criam tensões de cisalhamento na parte inferior das placas que as arrastam ao longo da superfície da terra, representado na Figura 7 (JANGID, 2013). A evidência fornecida pelos mecanismos de dorsais meso-oceânicas e regiões de convergência de placas tectônicas, bem como alta atividade sísmica nessas zonas foi usado para formular a teoria da Tectônica Global (ISACKS; MCKENZIE, 1968).

Figura 7 - Dinâmica do mecanismo de convecção

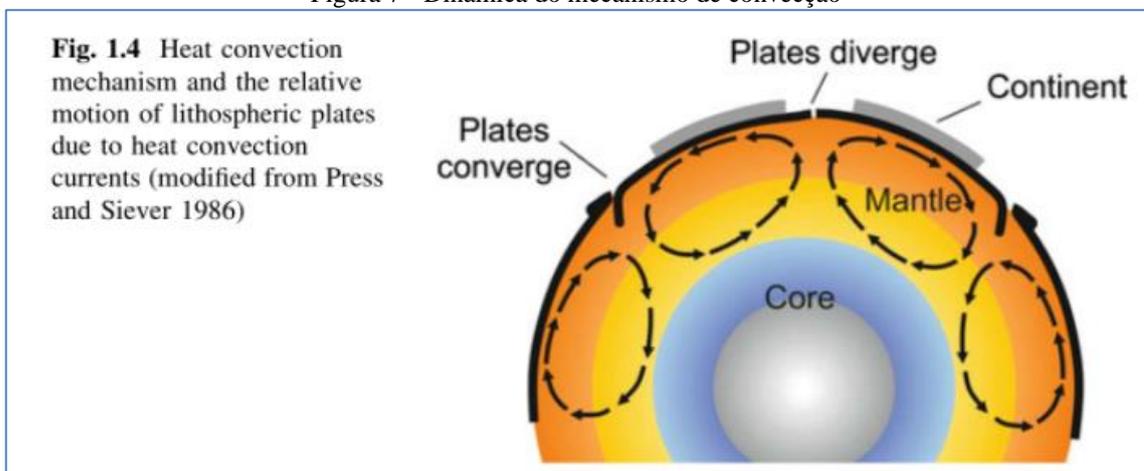


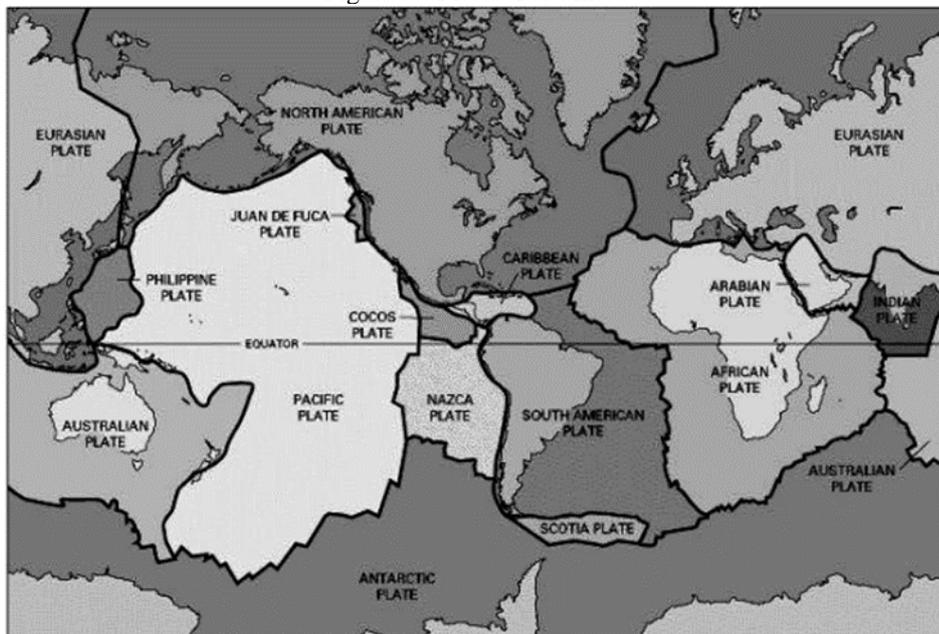
Fig. 1.4 Heat convection mechanism and the relative motion of lithospheric plates due to heat convection currents (modified from Press and Siever 1986)

Fonte: Sucuoglu e Akkar (2014)

2.2.4 Placas tectônicas

As placas tectônicas são representadas por crosta continental, crosta oceânica ou ambas e podem ser classificadas em grandes placas e pequenas placas. A distinção entre crosta continental e crosta oceânica é baseada na densidade dos materiais constituintes. A crosta continental é composta principalmente de granito, por isso é relativamente leve, uma espessura média pode ser de cerca de 30-40 km; enquanto a parte mais espessa é de cerca de 70 km, por exemplo, a que ocorre na zona do Himalaia e do Tibete. A crosta oceânica é mais densa que a continental, sendo composta de basalto, e é relativamente fino, cerca de 7 km de espessura. Como resultado, a crosta oceânica geralmente fica abaixo do mar nível, enquanto a crosta continental está situada acima do nível do mar. Existem 52 placas tectônicas importantes, onde 14 são do tipo grande e 38 do tipo pequena (GIONCU; MAZZOLANI, 2011). Dentre as 14 grandes placas (Figura 8), as sete principais placas tectônicas são: Africana (placa continental), Antártica (placa continental), Australiana (placa continental), Eurasiana (placa continental), Norte Americana (placa continental), Sul-Americana (placa continental) e Pacífica (placa oceânica), segundo Gioncu e Mazzolani (2011).

Figura 8 - Placas Tectônicas

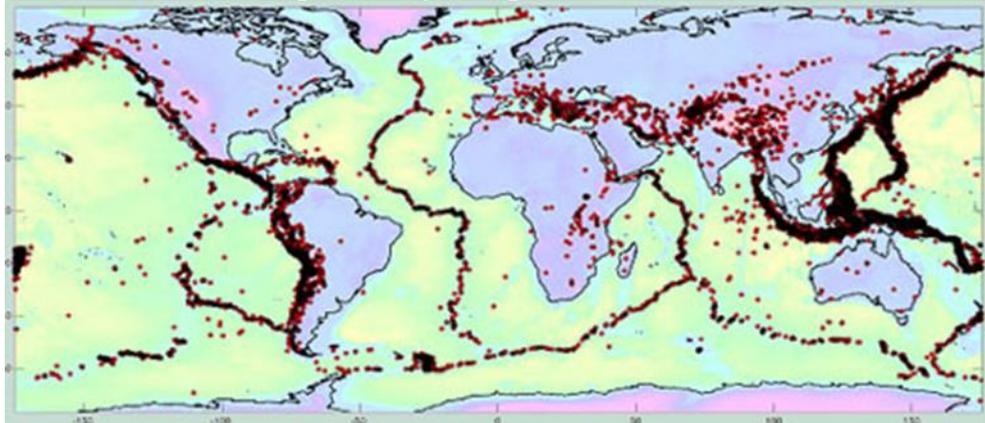


Fonte: Jangid (2013)

À medida que a placa desliza sobre a astenosfera, os continentes e oceanos se movem com ela. Como as placas se movem em direções diferentes, elas batem contra suas vizinhas nos

limites. As grandes forças assim geradas no limite das placas constroem cordilheiras, vulcânicas e terremotos. A maior parte da principal atividade geológica da Terra ocorre nos limites das placas, zonas onde as placas se encontram e interagem (JANGID, 2013). A Figura 9 mostra a distribuição de terremotos ao redor do mundo.

Figura 9 - Mapa de registro de terremotos



Fonte: Jangid (2013)

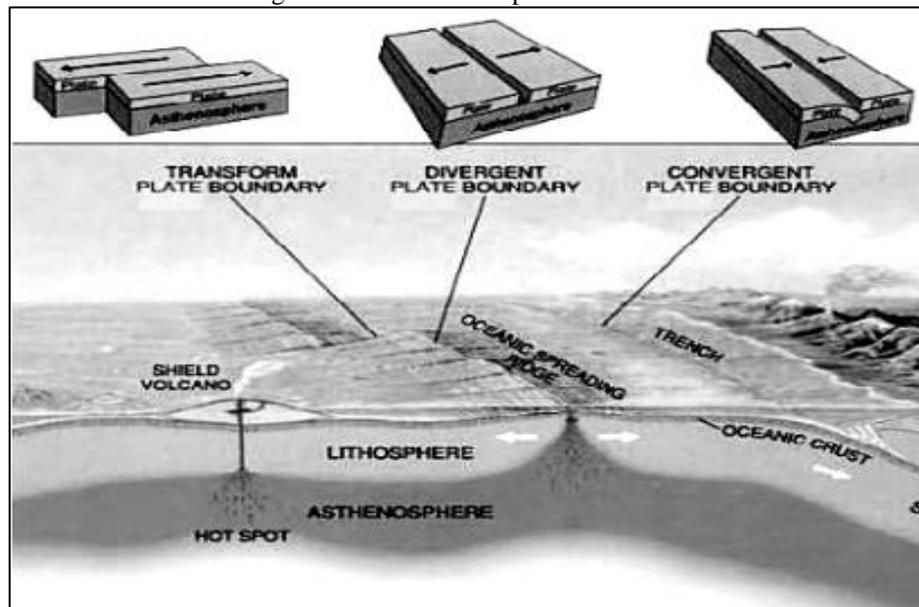
O terremoto que ocorre em um limite de placa é conhecido como terremoto interplacas. A grande maioria, mais de 95% dos registros, são de terremotos interplacas (CHANDRADHARA, 2018). Nem todos os terremotos ocorrem nos limites das placas. Embora a porção interior de uma placa seja geralmente tectônica silenciosa, os terremotos também ocorrem longe dos limites das placas. Esses terremotos são conhecidos como terremotos intraplacas e são menos usuais. O tempo de recorrência – estimativa da probabilidade de ocorrência de um evento - para um terremoto intraplaca é muito maior do que o de terremotos interplacas (JANGID, 2013).

Quando as placas se encontram, o resultado depende da densidade das respectivas placas. A hipótese essencial da tectônica de placas é que o interior da placa é rígido e que as deformações ficam restritas aos limites da Placa, formando redes de falhas. Os movimentos relativos são produzidos ao longo das fronteiras com velocidade variando ao longo da Terra, mas com uma média da ordem de dezenas de centímetros por ano (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

2.2.5 Limites de placas tectônicas

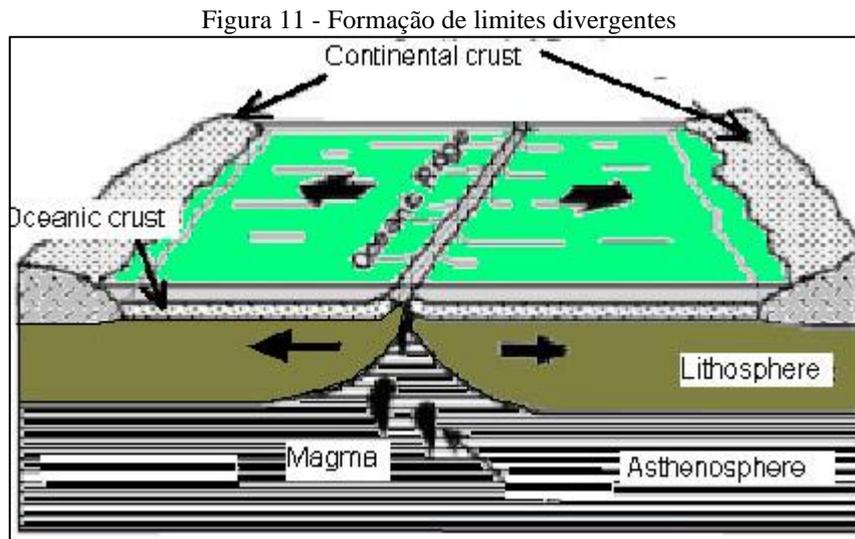
Na região de onde sai a lava quente derretida, o movimento dos dois limites é divergente e, portanto, alguma falha na forma de uma fenda é criada. Ao contrário, na região onde a massa rochosa fria entra na Terra, o movimento das duas fronteiras é convergente e, devido à colisão ao longo da falha, formam-se alguns vulcões e cadeias montanhosas (GIONCU; MAZZOLANI, 2011). De acordo com Gioncu e Mazzolani (2011), considerando esses movimentos relativos, existem diferentes tipos de limites 3 tipos de falhas (Figura 10):

Figura 10 - Falhas entre placas tectônicas



Fonte: Gioncu e Mazzolani (2011)

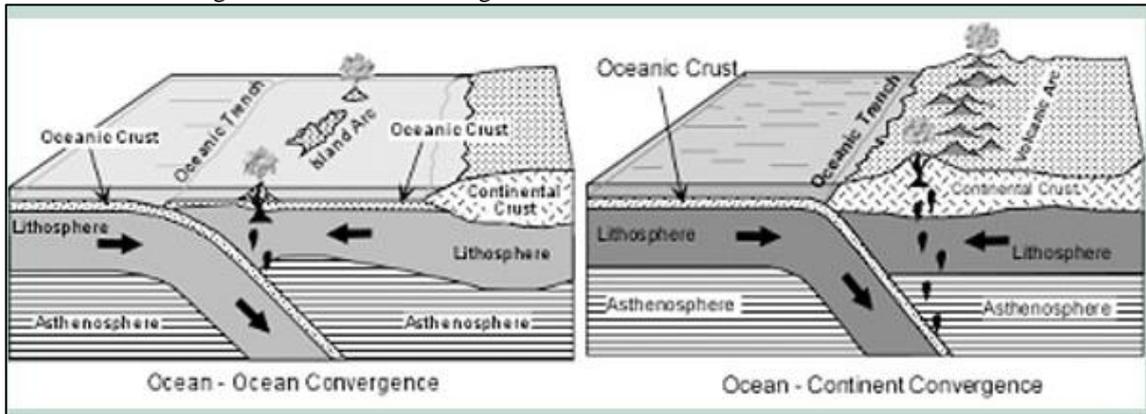
a) Limites divergente/construtivos/extensionais: quando duas placas se afastam uma da outra, devido à ascensão da lava derretida, que preenche a falha aberta entre as duas placas (Figura 11); A maior taxa de espalhamento ou expansão entre as placas ocorre perto das cristas do Oceano Pacífico e a menor taxa de espalhamento ocorre ao longo das cristas do meio do Oceano Atlântico (JANGID, 2013). Existem dois tipos de limites divergentes: limites divergentes continentais, que ocorre abaixo de uma placa continental espessa, como é o caso do vale do Rift da África Oriental e a Islândia; e os limites divergentes oceânicos, que ocorre abaixo de uma placa oceânica, como é o caso da Dorsal Meso-Atlântica (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).



Fonte: Jangid (2013)

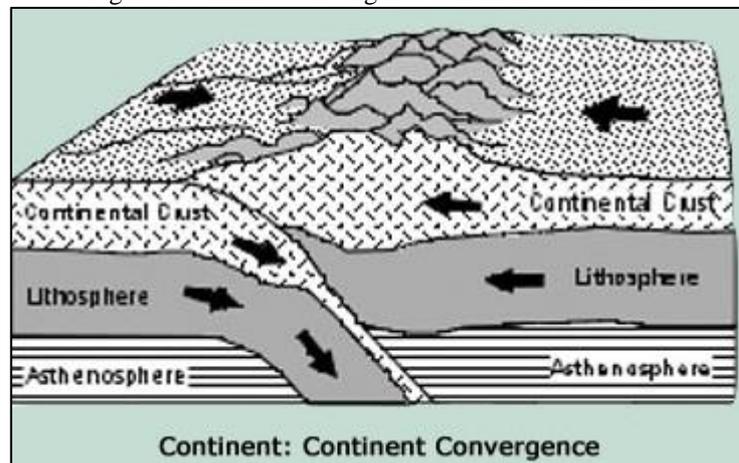
b) Limites convergentes/destrutivo: quando duas placas se encontram. Esses limites são criados por meio de encontro de placas oceânicas (convergência oceano-oceano), entre placas continentais e placas oceânicas (convergência oceano-contidente) ou entre duas placas continentais (convergência continente-contidente). Na junção onde as duas placas oceânicas se encontram, forma-se uma fossa conhecida como fossa oceânica, e um exemplo é o encontro da Placa Indo-Australiana com a Placa de Andaman e Sunda. Quando duas placas continentais colidem, a subducção cessa e uma cadeia de montanhas é formada pela compressão e elevação da crosta continental em ambas as placas (Figura 13). As montanhas do Himalaia entre a Índia e a China foram formadas dessa maneira (JANGID, 2013). Já em um limite convergente oceano-contidente (Figura 12), ocorre a subducção da placa continental sobre a placa oceânica, formando cadeias de montanhas de grandes extensões, como é o caso da Cordilheira dos Andes, na América do Sul, formada pela Placa oceânica de Nazca que empurra a placa Continental Sul-Americana (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

Figura 12 - Limites convergentes Oceano-Oceano e Oceano-Contidente



Fonte: Jangid (2013)

Figura 13 - Limite convergente Continente-Contidente



Fonte: Jangid (2013)

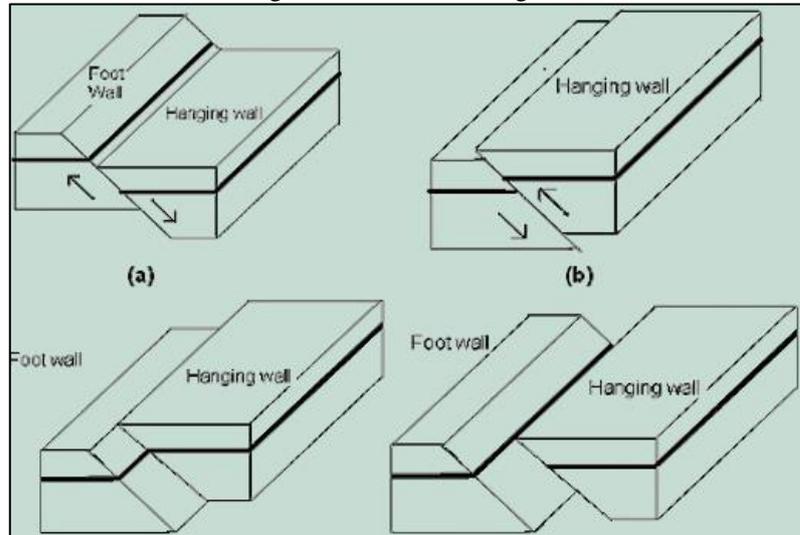
c) Limites transformantes, quando duas placas se movem lado a lado ao longo da mesma falha com velocidades diferentes ou em direções opostas; geralmente, esse tipo de limite não é estudado em Engenharia Sísmica pois seus efeitos não atingem áreas habitáveis e atuam notadamente em regiões oceânicas (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

2.2.6 Falhas

O termo falha é usado para descrever uma descontinuidade dentro da massa rochosa, ao longo da qual o movimento aconteceu no passado. O limite da placa também é um tipo de falha. A maioria das falhas produz deslocamentos repetidos ao longo do tempo geológico. O movimento ao longo de uma falha pode ser gradual ou às vezes repentino, gerando um terremoto. Existem 4 tipos de falhas conhecidas (Figura 14): falhas normais, quando o bloco deslocado se posiciona abaixo do plano de falha (a); falhas reversas, onde o bloco deslocado se

posiciona acima do plano de falha (b); falhas transcorrentes, provocado pelo deslocamento no plano horizontal entre blocos; e falhas oblíquas, cujo movimento dos blocos apresenta uma componente vertical e componente horizontal (JANGID, 2013).

Figura 14 - Falhas Geológicas



Fonte: Jangid (2013)

2.2.7 Teoria do rebote elástico

Harry Fielding Reid (1859-1944) foi um professor de física e geologia na Universidade John Hopkins que formulou o modelo mais aceito atualmente para explicar a ocorrência de terremotos. Segundo Reid, os terremotos são provocados por meio da liberação de energia elástica acumulada de deformação das rochas das paredes das falhas devido ao movimento de placas tectônicas. Portanto, a energia se acumula até o ponto em que a falha não consegue absorvê-la em forma de deformação e uma vez que é liberado o excesso de energia, ocorre acúmulo de deformação até a manifestação de outro terremoto (MOLIN; RIBEIRO, 2018).

A teoria do rebote elástico é a primeira teoria que descreve a ruptura da falha como a fonte de forte tremor de terra. Antes deste princípio, acreditava-se que a ruptura da falha era o resultado do tremor de terra, ou seja, o raciocínio inverso. Com exceção dos terremotos vulcânicos que são resultados de movimentos súbitos e maciços de magma, todos os terremotos são causados por ruptura em falhas geológicas. A ruptura começa em um ponto particular e então se propaga ao longo do plano de falha muito rapidamente: em média, as velocidades de ruptura da falha estão entre 2 e 3 km/s (SUCUOGLU; AKKAR, 2014).

2.2.8 Ondas sísmicas

As vibrações do terremoto se originam do ponto de início da ruptura e se propagam em todas as direções. Essas vibrações percorrem as rochas na forma de ondas elásticas. Principalmente, existem três tipos de ondas associadas à propagação de uma onda de tensão elástica gerada por um terremoto. Estas são ondas primárias (P), ondas secundárias (S) e ondas de superfície (JANGID, 2013). Além disso, existem subvariedades entre eles. As características importantes desses três tipos de ondas são as seguintes:

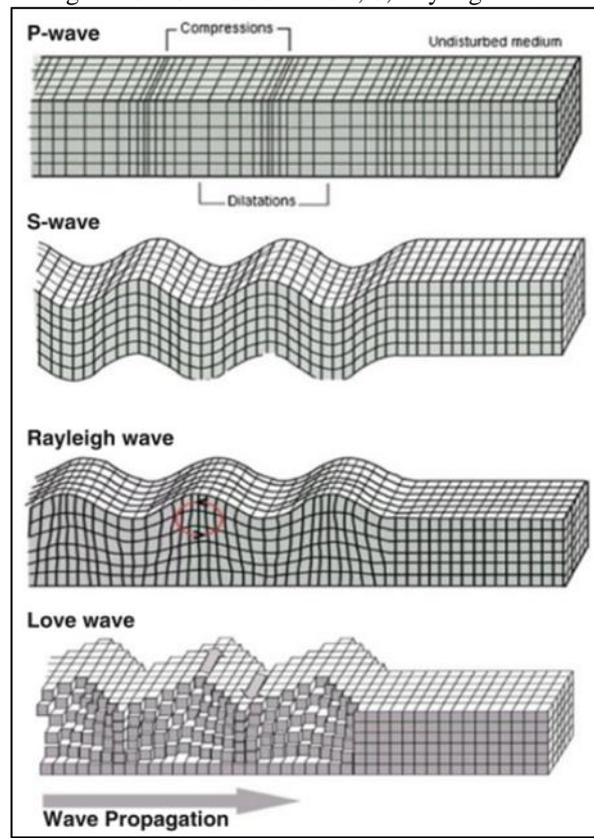
a) Ondas primárias/longitudinais/compressivas (P): ondas que se propagam da direção de propagação; são mais velozes, podendo chegar entre 8 a 13 km/s dependendo da densidade do material, são capazes de se propagar em meios líquidos, sólidos e gasosos.

b) Ondas secundárias/transversais/de cisalhamento (S): ondas que se propagam perpendicularmente à direção de propagação; se propagam apenas em meios sólidos.

c) Ondas de Superfície: se propagam apenas na superfície da terra e não se propagam no interior do planeta, são mais lentas e as últimas a serem registradas pelas estações sísmicas; são capazes de se propagar entre meios sólidos e líquidos; natureza complexa; podem ser classificadas em Ondas Love e Ondas Rayleigh. As ondas do tipo Love, movem o solo de lado a lado com velocidade de 2 a 4,4 km/s. Por outro lado, ondas do tipo Rayleigh movem o solo para cima e para baixo e de lado a lado (GIONCU; MAZZOLANI, 2011). As ondas superficiais são as que atingem às construções.

As ondas do tipo Love, movem o solo de lado a lado com velocidade de 2 a 4,4 km/s. Por outro lado, ondas do tipo Rayleigh movem o solo para cima e para baixo e de lado a lado (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

Figura 15 - Ondas sísmicas P, S, Rayleigh e Love

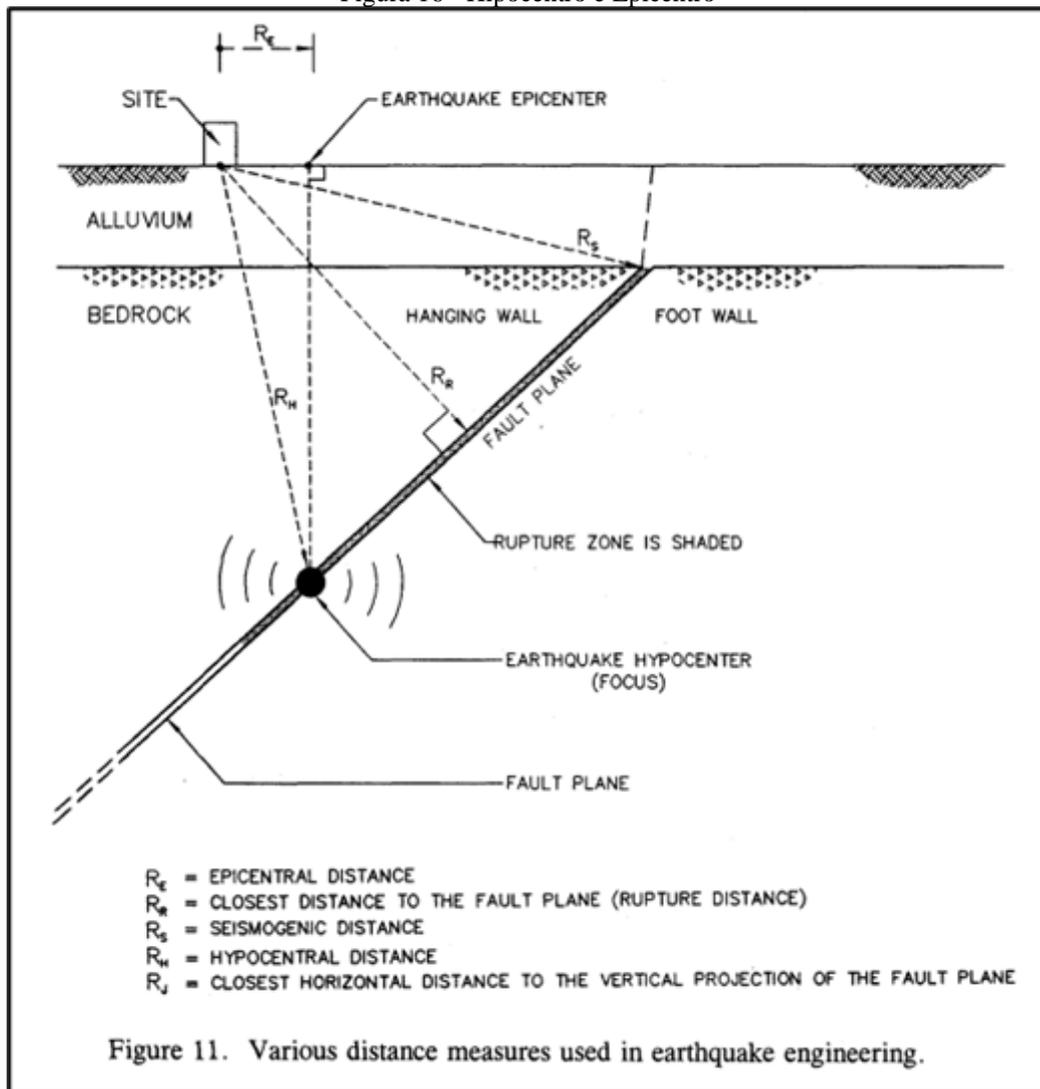


Fonte: Sucuoglu e Akkar (2014)

2.2.9 Hipocentro e epicentro

A localização da origem de propagação de ondas sísmicas é denominada hipocentro, enquanto a projeção na superfície da terra diretamente acima do hipocentro é denominada epicentro (SCAWTHORN, 1999), conforme representado na Figura 16. Quanto menor a distância entre essas duas medidas, mais danoso é o terremoto.

Figura 16 - Hipocentro e Epicentro



Fonte: FHWA (1997)

2.2.10 Magnitude de terremotos

A magnitude de um sismo está relacionada com a quantidade de energia libertada pela ruptura geológica que o provoca, sendo, portanto, uma medida da dimensão absoluta do sismo, sem referência à distância do epicentro. Ao longo dos anos, surgiram várias abordagens para a medição da magnitude de um terremoto (JANGID, 2013).

Uma definição viável de magnitude foi proposta pela primeira vez por C.F. Richter (JANGID, 2013). Com base nos dados de terremotos californianos, Richter definiu a magnitude do terremoto como o logaritmo na base 10 do maior deslocamento de um sismógrafo padrão (chamado Sismógrafo Wood-Anderson com propriedades $T = 0,8$ seg; $m = 2800$; e amortecimento quase crítico $\approx 0,8$) situado a 100 km do foco, representado pela Equação 1.

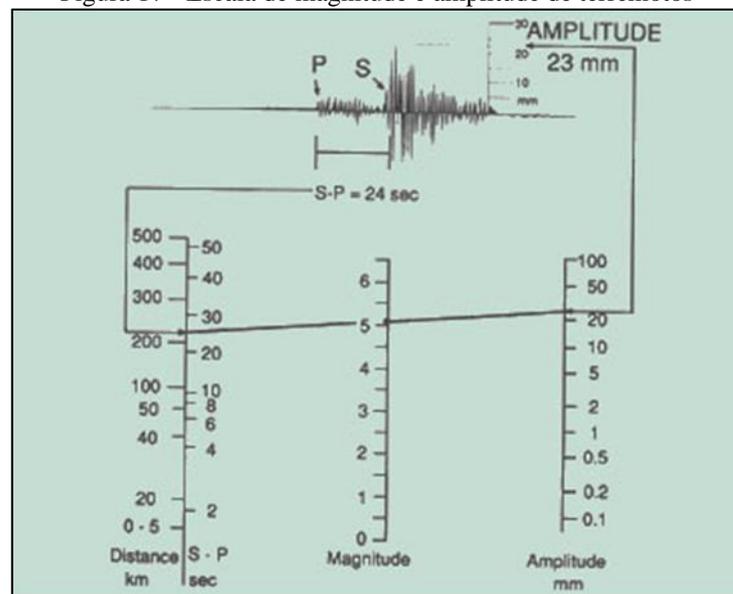
$$M = \log_{10} A \quad (1)$$

Onde M é a magnitude do terremoto, A denota a amplitude em micrómetros (10⁻⁶m) registrada pelo instrumento localizado a uma distância epicentral de 100 km; e M é a magnitude do terremoto. Quando a distância do epicentro em que uma observação é obtida é diferente de 100 km, uma correção é introduzida na Equação 2, como segue:

$$M = M_a - 1,73 \log_{10} \left(\frac{100}{\Delta} \right) \quad (2)$$

Onde M é a magnitude do terremoto; Δ =distância do epicentro (km), $M\Delta$ = magnitude do terremoto calculada para terremoto usando os valores medidos a uma distância Δ do epicentro. A forma gráfica deste procedimento é apresentada na Figura 17. Devido à natureza logarítmica da definição, uma diferença de 1,0 na magnitude representa uma diferença de 10 na amplitude do sismógrafo. Observações de magnitude por diferentes estações de gravação geralmente diferem bastante, muitas vezes até uma magnitude, que é posteriormente corrigida levando em consideração as gravações de muitos instrumentos (JANGID, 2013).

Figura 17 - Escala de magnitude e amplitude de terremotos



Fonte: Jangid (2013)

2.3 TERREMOTOS

Scawthorn (1999) conceitua os terremotos como movimentos vibratórios do solo de larga extensão que ocorrem naturalmente, causados por uma série de fenômenos, incluindo movimentos tectônicos do solo, vulcanismo, deslizamentos de terra, explosões de rochas ou explosões induzidas pela ação humana.

Por outra perspectiva, Jangid (2013) define terremoto como a vibração da superfície da Terra causada por ondas provenientes de uma fonte de perturbação no interior dela, e cuja maioria dos terremotos de significância de engenharia são de origem tectônica e são causados por deslizamento ao longo de falhas geológicas. As características típicas do terremoto dependem do deslocamento total da falha, tamanho da área deslizada, rugosidade do processo de deslizamento, forma de falha (falha normal, falha reversa, falha de deslizamento), proximidade da área escorregada com a superfície do solo e parâmetros do solo. À medida que as ondas irradiam da falha, elas sofrem propagação geométrica e atenuação devido à perda de energia nas rochas. Como o interior da Terra é constituído por formações heterogêneas, as ondas sofrem múltiplas reflexões, retração, dispersão e atenuação à medida que viajam. As ondas sísmicas que chegam a um local na superfície da Terra são o resultado de uma superposição complexa que dá origem a movimentos irregulares (JANGID, 2013).

Já Gioncu e Mazzolani (2011) definem terremoto como um fenômeno resultante da liberação repentina de energia armazenada na crosta terrestre que cria ondas sísmicas. Na superfície da Terra, terremotos podem se manifestar por um tremor ou deslocamento do solo e às vezes tsunamis, que podem levar à perda de vidas e destruição de propriedades humanas. O grande número de observações e registros de movimento do solo para terremotos em todo o mundo, juntamente com análises de resposta do solo, indicaram que este fenômeno natural tremendamente complicado de terremotos é muito difícil de entender e prever. Apesar da quantidade considerável de dados disponíveis até agora e uma literatura relevante sobre esses tópicos, ninguém pode dizer com suficiente confiança que existem conhecimentos exatos e declarações rigorosas sobre esses eventos que ocorrem abaixo da crosta terrestre devido a forças imprevisíveis em um momento imprevisto (GIONCU; MAZZOLANI, 2011). Portanto, cada terremoto é único, sendo o resultado do efeito de muitos fatores (definido por tipo e intensidade), influenciando os movimentos do solo e gerando fenômenos complexos.

As perdas humanas e econômicas são geralmente consideradas como as principais características de um terremoto, que é classificada de acordo com sua magnitude; mas podemos

observar que este aspecto não pode ser considerado apenas como fator representativo. De fato, existem alguns casos em que terremotos muito fortes em magnitude não produziram perdas importantes, como por exemplo o terremoto de 1960 no Chile, com magnitude 9,5, e o terremoto do Alasca de 1964, com magnitude 9,2, porque ambos ocorreram em zonas com baixa densidade populacional. Ao contrário, há outros casos, em que mesmo terremotos de magnitude moderada causaram danos muito grandes o que era previsível, pois ocorreram em zonas urbanizadas: a Terremoto de Northridge, com magnitude 6,7, o terremoto mais prejudicial na história dos EUA e o terremoto de Kobe em 1995 com magnitude 6,9, um devastador terremoto na história do mundo. Considerando esses diferentes eventos, pode-se olhar para o terremoto como um fenômeno local com algumas características distintas, que diferem entre si devido à sua tipologia peculiar. Partindo das características básicas, dadas por a fonte, a sobreposição de diferentes fatores de influência pode alterar essas características por criando amplificação ou atenuação dos movimentos do solo, aumentando ou reduzindo a duração do movimento etc. (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

2.3.1 Terremotos históricos

O registro de terremotos históricos permite compreender um pouco melhor a influência de distintos parâmetros que envolvem um terremoto como por exemplo sua magnitude e suas consequências para a sociedade (culturais, econômicas e vidas humanas). Terremotos da antiguidade, por exemplo, resultaram em danos a obras de notável importância cultural para a humanidade: o terremoto de Rhodes, 226 AC, destruiu o Colosso, umas das esculturas mais importantes da antiguidade; o terremoto de 1349 em Roma danificou severamente o Coliseu Romano, que colapsou as paredes externas do lado sul da Construção. O terremoto com maior número de vítimas registrado ocorreu na China Central, na província de Xianxim, em 1556, provocando a morte de 830.000, onde a maioria da população afetada vivia em cavernas esculpidas em rocha macia. Um dos mais conhecidos terremotos, que também é conhecido como o terremoto mais devastador da história da Europa, ocorreu em Lisboa em 1755, onde um tremor de magnitude de 8,7 produzido no Mar Atlântico afetou a Península Ibérica, provocando morte de milhares de pessoas ao longo das regiões costeiras e com incêndios prolongados (alguns com duração de 6 dias), e destruição de metade das habitações de Lisboa (GIONCU; MAZZOLANI, 2011). A Tabela 1 traz os registros de terremotos recentes categorizados em intervalos de magnitude e contagem total de vítimas fatais. A Tabela 2 discretiza importantes

terremotos que ocorreram na antiguidade, idade média e idade contemporânea, bem como a região afetada e o número de mortes provocado pelo evento.

Tabela 1 - Terremotos notáveis entre 1990 e 2009

| Ano | Magnitude | | | | Total | Vítimas Fatais |
|------|-----------|---------|---------|---------|-------|----------------|
| | 5.0-5.9 | 6.0-6.9 | 7.0-7.9 | 8.0-9.9 | | |
| 1990 | 1635 | 115 | 12 | 0 | 1762 | 52000 |
| 1991 | 1469 | 105 | 11 | 0 | 1585 | 2300 |
| 1992 | 1541 | 104 | 23 | 0 | 1668 | 3800 |
| 1993 | 1449 | 141 | 15 | 1 | 1606 | 10000 |
| 1994 | 1542 | 161 | 13 | 2 | 1718 | 1050 |
| 1995 | 1327 | 185 | 22 | 3 | 1537 | 8000 |
| 1996 | 1223 | 160 | 21 | 1 | 1405 | 500 |
| 1997 | 1118 | 125 | 20 | 0 | 1263 | 3000 |
| 1998 | 979 | 113 | 14 | 2 | 1108 | 9000 |
| 1999 | 1106 | 123 | 23 | 0 | 1252 | 23000 |
| 2000 | 1345 | 158 | 14 | 1 | 1518 | 200 |
| 2001 | 1243 | 126 | 15 | 1 | 1385 | 21500 |
| 2002 | 1086 | 132 | 13 | 0 | 1231 | 1700 |
| 2003 | 1203 | 140 | 14 | 1 | 1358 | 33819 |
| 2004 | 1118 | 139 | 13 | 2 | 1272 | 284000 |
| 2005 | 1700 | 144 | 10 | 1 | 1855 | 89354 |
| 2006 | 1427 | 132 | 10 | 1 | 1570 | 6666 |
| 2007 | 1696 | 167 | 14 | 4 | 1881 | 789 |
| 2008 | 1768 | 168 | 12 | 0 | 1948 | 88011 |
| 2009 | 1465 | 125 | 15 | 1 | 1606 | 1748 |

Fonte: Gioncu e Mazzolani (2011)

Tabela 2 - Terremotos históricos da Antiguidade a Idade Moderna

| <i>Data</i> | | <i>Localização</i> | <i>Magnitude</i> | <i>Mortes</i> |
|-------------|-------|--------------------|------------------|---------------|
| 464 AC | - | Esparta | - | - |
| 226 AC | - | Grécia, Rhodes | - | - |
| 365 | - | Creta, Knossos | - | 50.000 |
| 526 | 20.05 | Síria, Antiochia | - | 250.000 |
| 844 | - | Síria, Damascus | - | 70.000 |
| 856 | - | Irã, Damghan | - | 200.000 |
| 856 | - | Grécia, Corinth | - | 45.000 |
| 893 | - | Índia, Daipur | - | 180.000 |
| 893 | 23.03 | Irã, Ardabil | - | 150.000 |
| 1138 | 09.08 | Síria, Aleppo | - | 230.000 |
| 1268 | - | Turquia, Anatólia | - | 60.000 |
| 1290 | - | China, Chihli | - | 100.000 |
| 1349 | - | Itália, Rome | - | - |
| 1456 | - | Itália, Napoli | - | 80.000 |
| 1556 | 21.01 | China, Shaanxi | 8.0 | 830.000 |

| | | | | |
|------|--------|----------------------------|-----|---------|
| 1662 | - | China, Anhwei | - | 300.000 |
| 1667 | - | Cáucaso, Shemakha | - | 80.000 |
| 1693 | 11.01 | Itália, Sicília | - | 100.000 |
| 1700 | 26.01 | Canadá, Cascadia | 9.0 | - |
| 1727 | 08.11 | Irã, Tabriz | - | 77.000 |
| 1730 | 30.12 | Japão, Hokkaido Island | - | 137.000 |
| 1731 | - | China, Beijing | - | 100.000 |
| 1737 | 11.10 | Índia, Calcutta | - | 300.000 |
| 1755 | 01.11 | Portugal, Lisbon | 8.7 | 70.000 |
| 1780 | - | Irã, Tabriz | - | 100.000 |
| 1783 | 04. 02 | Itália, Calabria | - | 50.000 |
| 1811 | - | Estados Unidos, New Madrid | 8.6 | - |
| 1856 | 12.10 | Grécia, Creta | 7.8 | - |
| 1883 | 26.08 | Java | - | 100.000 |
| 1897 | - | Índia, Gujarat | 8.0 | 1.600 |

Fonte: Gioncu e Mazzolani (2011)

O século 20 foi marcado por acontecimentos importantes que auxiliaram a humanidade a desenvolver procedimentos para a compreensão de terremotos e tecnologia para prevenção contra eventos sísmicos (Tabela 3). Notadamente, a partir de 1950, observa-se um forte avanço do desenvolvimento da Sismologia e da Engenharia sísmica, que tiveram grande influência na elaboração de conceitos antissísmicos. Nesse século também houve eventos sísmicos notáveis. Em 1906, nos Estados Unidos, um sismo provocado por uma abertura de 430 km de extensão na Falha de San Andreas, na região da Califórnia, iniciou um terremoto de 7,8 de magnitude, o que provocou um incêndio generalizado na área de São Francisco. Esse evento abriu portas para o estudo da relação entre terremotos e falhas, e a criação da Engenharia Sísmica como ciência nos Estados Unidos (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

Outro grande terremoto ocorrido neste século foi o registro na região da Calábria, na Itália em 1908 de magnitude 7,5 provocado pela subducção da Placa Tectônica Continental Africana sob a Placa Tectônica Continental Eurasiana. Este tremor promoveu o surgimento de ondas de 15 metros de altura, um dos maiores maremotos já registrados na história, além de provocar a morte de 83000 pessoas (GIONCU; MAZZOLANI, 2011). Este terremoto também deu origem a engenharia sísmica na Itália, com os primeiros registros de recomendação de design de estruturas antissísmicas baseadas nos métodos de análise deste evento.

No Japão, em 1923, foi registrado um dos terremotos mais devastadores do país, na região de Tóquio. O terremoto teve origem devido à presença de um sistema de falhas associado

a 4 placas tectônicas próximas ao país: Pacífico, Filipinas, América do Norte e Eurásia. A subducção da Placa do Pacífico sob as outras placas tectônicas provocou a danificação de mais da metade do parque imobiliário das cidades de Tóquio e Yokohama, um maremoto de 12 metros próximo a região de Atami e incêndios devastadores assolaram a região. Após este terremoto, o Instituto de Pesquisa da Universidade de Tóquio foi o primeiro grupo de pesquisa formado para estudando sismologia e engenharia sísmica. Essas pesquisas contribuíram significativamente para o progresso do conhecimento dos terremotos no Japão (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

Tabela 3 - Terremotos notáveis do século 20

| <i>Ano</i> | <i>Data</i> | <i>Localização</i> | <i>Magnitude</i> | <i>Mortes</i> | <i>Dano(bilhões de dólares)</i> |
|------------|-------------|------------------------|------------------|---------------|---------------------------------|
| 1905 | 04.04 | India, Kangra | 8.6 | 20.000 | - |
| 1906 | 18.04 | USA , San Francisco | 7.8 | 1.000 | 0.5 |
| 1906 | 17.08 | Chile, Valparaiso | 8.2 | 20.000 | - |
| 1906 | 31.01 | Ecuador | 8.8 | - | - |
| 1908 | 28.12 | Italy, Messina | 7.5 | 83.000 | - |
| 1920 | 16.12 | China , Gansu | 8.6 | 220.000 | - |
| 1923 | 03.02 | Kamchatka | 8.5 | - | - |
| 1923 | 01.09 | Japan , Kanto | 8.3 | 143.000 | - |
| 1927 | 22.05 | China , Xining | 8.3 | 200.000 | - |
| 1932 | 25.12 | China, Gansu | 7.6 | 70.000 | - |
| 1935 | 30.05 | Pakistan, Quelta | 7.5 | 60.000 | - |
| 1938 | 01.02 | Indonesia | 8.5 | - | - |
| 1939 | 25.12 | Chile, Concepcion | 8.3 | 25.000 | - |
| 1939 | 26.12 | Turkey, Erzincan | 7.9 | 25.000 | - |
| 1940 | 10.11 | Romania, Vrancea | 7.4 | - | - |
| 1940 | 18.05 | USA, El Centro | 7.1 | - | - |
| 1948 | 05.10 | Turkmenistan, Ashgabat | 7.3 | 110.000 | - |
| 1950 | 15.08 | India, China border | 8.6 | - | - |
| 1952 | 04.11 | Kamchatka | 9.0 | - | - |
| 1957 | 09.03 | Aleutian Islands | 9.1 | - | - |
| 1960 | 24.04 | Morocco, Agadir | 5.9 | 12.000 | - |
| 1960 | 22.05 | Chile, Valdivia | 9.5 | 6.000 | 0.5 |
| 1963 | 13.10 | Kuril Islands | 8.5 | - | - |
| 1964 | 28.03 | USA, Alaska, Anchorage | 9.2 | 116 | 0.4 |
| 1970 | 31.05 | Peru, Ancash | 8.1 | 66.000 | 0.5 |
| 1976 | 27.07 | China, Tangshan | 8.0 | 250.000 | 2 |
| 1977 | 04.04 | Romania, Vrancea | 7.2 | 1.600 | 2 |
| 1980 | 10.10 | Algeria, El Asnam | 7.3 | 9.700 | 2 |
| 1985 | 19.09 | Mexico, Mexico City | 8.1 | 20.000 | 5 |
| 1988 | 07.12 | Armenia, Spitak | 7.1 | 25.000 | 16 |
| 1989 | 17.10 | USA, Loma Prieta | 7.1 | 70 | 8 |

| | | | | | |
|------|--------|------------------|-----|--------|-----|
| 1990 | 21. 07 | Iran, Manjil | 7.7 | 40.000 | - |
| 1993 | 29.09 | India, Killari | 6.3 | 23.000 | - |
| 1994 | 17. 01 | USA , Northridge | 6.7 | 63 | 40 |
| 1995 | 17. 01 | Japan, Kobe | 6.9 | 5.600 | 140 |
| 1997 | 26.09 | Italia, Umbria | 5.9 | 11 | - |
| 1997 | 10. 05 | Iran, Ardebil | 7.1 | 1.600 | - |
| 1998 | 30. 05 | Afghanistan | 7.1 | 5.000 | - |
| 1999 | 17. 08 | Turkey, Izmit | 7.4 | 20.000 | 30 |
| 1999 | 21. 09 | Taiwan, Chi- Chi | 7.3 | 2.500 | 1 |

Fonte: Gioncu e Mazzolani (2011)

2.4 Danos sísmicos às construções

Danos resultantes de terremotos às construções podem ser diretamente atribuíveis aos efeitos do terremoto ou pode ser um resultado indireto de danos diretos. Da mesma forma, danos diretos de terremotos podem resultar de ambos os impactos primários do terremoto (ou seja, tremor do solo e ruptura das falhas geológicas) ou de impactos secundários, como deslizamentos de terra e liquefação do solo, gerados por impactos primários (FHWA, 1997).

Os danos diretos estão associados notadamente devido aos fortes tremores e ruptura das falhas geológicas. Os danos primários estão relacionados aos danos que provocam o colapso parcial ou total da estrutura. A magnitude do dano depende da tanto da intensidade quanto da frequência do tremor. Esses fatores dependem da magnitude do terremoto, mecanismo de origem, localização do local em relação ao ponto de liberação de energia do terremoto, características do tipo de fundação e tipologia estrutural. Danos provocados por ruptura estão associados a amplitude, distribuição espacial e direção dos esforços causados na estrutura (FHWA, 1997). Além disso, a relação da frequência natural da estrutural com a frequência do forte tremor é um fator importante que influencia no potencial danos às construções.

Os danos secundários são geralmente associados a fenômenos que ocorrem no solo onde estão situadas as construções. Dentre os possíveis eventos associados a estes tipos de dano, podemos destacar: deslizamentos de terra (danos à fundações ou a própria estrutura), perda de resistência de solos saturados por liquefação, falha da capacidade de carga de estruturas de fundações, espalhamento lateral de solos provocados por liquefação, instabilidade de taludes, incêndios e explosões (ruptura de instalações de linhas de distribuição de gás e eletricidade), danos às instalações sanitárias, vazamento de produtos químicos, etc (FHWA, 1997).

Os danos indiretos estão associados aos impactos socioeconômicos provocados pelos terremotos. Danos indiretos econômicos são a perda ou interrupção da distribuição de serviços essenciais como sistemas de água e energia, transporte e serviços (FHWA, 1997).

2.4.1 Efeito da ressonância em edifícios

Para compreender o efeito dos terremotos em construções, usam-se modelos como matrizes bidimensionais de linhas (representando colunas e vigas) ou linhas de pirulitos cujos círculos representam a massa dos edifícios. Essa forma de simplificação tem sido bem útil na prevenção dos efeitos sísmicos em edificações. Quando ocorre um terremoto, o tremor atinge primeiramente as bases das construções e suas fundações, responsáveis por transmitir as ondas sísmicas por toda a estrutura, fazendo-as vibrarem de um lado para o outro. A força de oscilação depende de dois fatores: a massa do edifício – que se concentra normalmente na porção inferior da estrutura – e sua rigidez – resistência necessária para causar os deslocamentos na estrutura. A rigidez do edifício está fortemente ligada à sua rigidez (MAY, 2015). Prédios mais baixos tendem a ser mais rígidos e se deslocam menos enquanto edifícios mais altos são mais flexíveis. As duas variáveis citadas anteriormente influenciam diretamente na característica frequência natural dos edifícios. A frequência, num sistema oscilante, corresponde a quantidade de ciclos que ocorrem por segundo, determinada pela sua massa e rigidez, representada pela equação 3 abaixo:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

Onde k representa a rigidez do sistema, m é a massa do sistema e f_n é a frequência natural do sistema. Dessa forma, a rigidez e a frequência natural são proporcionais entre si, enquanto a massa e a frequência são inversamente proporcionais. Quando a frequência natural de um sismo se iguala a frequência natural de um edifício, ocorre o efeito chamado ressonância, que amplifica as vibrações sentida nos edifícios. De maneira geral, baixas frequências de movimento causarão mais danos aos prédios mais altos e flexíveis ao passo que altas frequências afetam mais prédio menores e mais rígidos. Atualmente, engenheiros trabalham junto com sismólogos e geólogos para identificar a frequência dos terremotos que ocorrem em

determinada região para a prevenção de desabamento dos edifícios por ressonância (MAY, 2015).

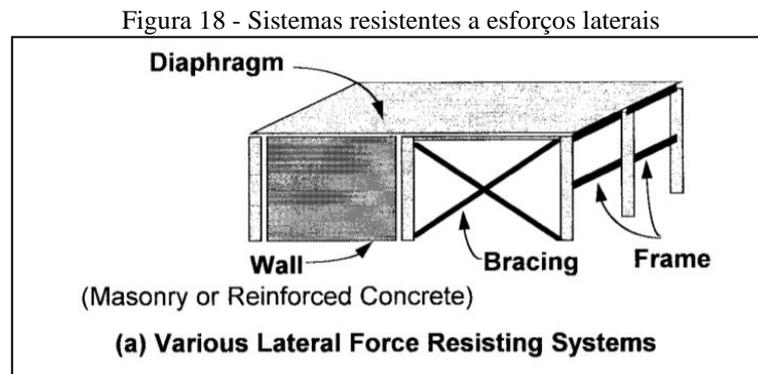
Um dos exemplos notáveis desse fenômeno foi o terremoto de 1985 ocorrido na cidade do México, no México. Após os tremores, prédios baixos se mantiveram de pé (até 4 andares), assim como edificações com mais de 15 andares. Por outro lado, a maioria das edificações que colapsaram e foram gravemente danificadas apresentavam altura mediana, geralmente entre 5 e 6 andares. O fenômeno que ocorreu nesse evento foi a ressonância, onde o solo apresentou frequência natural similar à frequência dos edifícios de altura mediana, amplificando as vibrações sentidas nestas construções (MAY, 2015).

2.5 Sistemas antissísmicos

Nos edifícios, os danos causados por terremotos podem ser divididos em duas categorias: danos estruturais e danos não estruturais, os quais podem ser perigosos para os ocupantes do edifício. Danos estruturais significam degradação dos sistemas de suporte estrutural do edifício (ou seja, sistemas resistentes à força vertical e lateral), como as estruturas e paredes do edifício enquanto danos não estruturais referem-se a qualquer dano que não afetar a integridade do sistema de suporte estrutural. Exemplos de danos não estruturais são o colapso de uma chaminé, quebra de janelas ou queda de tetos, danos em tubulações, interrupção de bombas, painéis de controle, equipamentos de telecomunicações etc. Danos não estruturais ainda podem ser fatais e onerosos. O tipo de dano a ser esperado é uma questão complexa que depende do tipo estrutural e idade do edifício, sua tipologia estrutural, materiais de construção, as condições do local, a proximidade do edifício aos edifícios vizinhos e o tipo de elementos não estruturais (SCAWTHORN, 1999).

Os edifícios sofrem distorção horizontal quando sujeitos a movimentos sísmicos (Figura 18 - Sistemas resistentes a esforços laterais). Quando essas distorções se tornam grandes, o dano pode ser catastrófico. Assim, a maioria dos edifícios são projetados com sistemas de resistência à força lateral – *lateral force resisting systems* (LFRS) - para resistir aos efeitos das forças do terremoto e manter os deslocamentos dentro dos limites especificados. LFRS geralmente são capazes de resistir apenas a forças que resultam de movimentos do solo paralelos a eles. No entanto, a ação combinada do LFRS ao longo da largura e comprimento de um edifício pode ser utilizada como uma solução sismo-resistente contra movimentos de terremoto de qualquer direção. LFRS diferem de edifício para edifício porque o tipo de sistema

é controlado até certo ponto pelo layout básico e elementos estruturais do edifício. Basicamente, o LFRS consiste no uso de elementos resistentes contra esforços axiais, esforços de cisalhamento e esforços de flexão (SCAWTHORN, 1999).



Fonte: Scawthorn (1999).

Em edifícios com estrutura de madeira, a resistência às cargas laterais é normalmente fornecida por estratégias de contraventamento de madeira para edifícios mais antigos (especialmente casas) e o uso de “paredes de cisalhamento” formadas por tapumes de madeira compensada para edifícios mais novos (principalmente pós-segunda Guerra Mundial). Sem a força extra fornecida pelo contraventamento ou compensado, as paredes se deformariam excessivamente, resultando em janelas quebradas, portas emperradas, gesso rachado e, em casos extremos, colapso. Estrutura de madeira tendem a ser em sua maioria baixas (um a três andares, ocasionalmente quatro andares). O enquadramento vertical pode ser de vários tipos: parede de vigas, pilares e viga contraventados, ou troncos de madeira. Parede de vigas tendem a ser suportadas por madeira compensada ou elementos diagonais de madeira ou aço; Pilares e vigas contraventados é uma solução mais comum na Europa e Japão, com o uso de grandes seções retangulares para a composição de vigas e pilares; Troncos de madeira é uma das soluções menos utilizadas e está sujeita a deterioração da madeira pela exposição dos pilares, principalmente nas porções em contato com o solo (SCAWTHORN, 1999).

Os sistemas de resistência a terremotos em edifícios modernos de aço assumem muitas formas. Muitos tipos de configurações de contraventamento são utilizados (diagonal, “X”, “V”, “K”, etc). Pórticos momento-resistente também são capazes de resistir a cargas laterais. Neste tipo de construção, as ligações entre vigas e pilares são projetadas para resistir à rotação do pilar em relação à viga. Por isso, a viga e o pilar trabalham juntos e resistem ao movimento lateral por flexão. Isso é contrário da solução que envolve pórticos contraventados, onde as cargas são

resistidas através de forças de tração e compressão nos contraventamentos. Os edifícios de aço às vezes são construídos com estruturas resistentes ao momento em uma direção e armações contraventadas na outra, ou com paredes de cisalhamento integrais de concreto ou alvenaria (SCAWTHORN, 1999).

Em estruturas de concreto, as paredes de cisalhamento são algumas vezes usadas para fornecer resistência lateral, junto de pórticos momento-resistentes. Idealmente, essas paredes de cisalhamento são paredes contínuas de concreto armado, estendendo-se da fundação ao telhado do edifício, podendo ser paredes exteriores ou interiores. Elas estão interligadas com o resto do pórtico de concreto e, portanto, resistem ao movimento de um andar em relação a outro. As paredes de cisalhamento também podem ser construídas alvenaria estrutural (SCAWTHORN, 1999).

A configuração, ou a forma geral vertical e/ou horizontal dos edifícios, é um fator importante no desempenho e nos danos do terremoto. Edifícios que têm características simples, regulares, configurações simétricas geralmente exibem o melhor desempenho em terremotos. As principais razões para isso são (1) edifícios não simétricos tendem a ter torção (ou seja, têm modos de torção) além de sacudir lateralmente, e (2) as várias “asas” de um edifício tendem a agir de forma independente, resultando em movimentos diferenciais, rachaduras e outros danos. O movimento rotacional introduz danos adicionais, especialmente na reentrada ou cantos “internos” do edifício. O termo “configuração” também se refere à geometria dos sistemas de resistência à carga lateral, bem como a geometria do edifício. A assimetria pode aparecer também a partir da disposição de sistemas de contraventamento, paredes de cisalhamento ou pórticos resistentes quando são usados para fornecer resistência a terremotos em um edifício. Esse tipo de assimetria do O LFRS pode resultar em torção ou movimento diferencial, com as mesmas consequências que a assimetria no plano do edifício (SCAWTHORN, 1999).

As técnicas inovadoras podem ser divididas em duas grandes categorias: controle passivo (isolamento da base, dissipação de energia) e controle ativo, que cada vez mais estão sendo aplicados no projeto de novas estruturas ou no *retrofit* de estruturas existentes resistentes a vento, terremotos e outras cargas externas (SOONG; CONSTANTINO, 1994). A distinção entre controle passivo e ativo é que os sistemas passivos não requerem intervenção ativa ou fonte de energia, enquanto os sistemas ativos normalmente monitoram a estrutura e o movimento de entrada do solo e procuram controlar ativamente as massas ou forças na estrutura (via pesos móveis, tendões de tensão variável etc.) de modo a desenvolver uma resposta estrutural (idealmente) igual e oposta à resposta estrutural devido ao movimento de entrada do

solo. Sistemas de controle semiativos recentemente desenvolvidos parecem combinar as melhores características de ambas as abordagens, oferecendo a confiabilidade de dispositivos passivos, mas mantendo a versatilidade e adaptabilidade de sistemas totalmente ativos. Os amortecedores magnetoreológicos (MR), por exemplo, são novos dispositivos de controle semiativos que usam fluidos MR para criar amortecedor controlável (SCAWTHORN, 1999). Os resultados iniciais indicam que esses dispositivos são bastante promissores para aplicações de engenharia civil (CARLSON; SPENCER; SAIN, 1996).

2.5.1 Controle passivo

Amortecimento Suplementar: Se o amortecimento puder ser aumentado significativamente, então a resposta estrutural - e, portanto, esforços e deslocamentos - é bastante reduzida. (CONSTANTINO; SYMANS, 1993; HANSON; AIKEN; NIMS; RICHTER; BACHMAN, 1993). Os sistemas de amortecimento suplementares incluem sistemas de atrito (por exemplo, Sumitomo, *Pall e Friction-Slip*) baseados no atrito de Coulomb, resistência de atrito autocentrante, e outros vários mecanismos de dissipação de energia: Elementos ADAS (amortecimento e rigidez adicionados), que utilizam o rendimento de placas X de aço macio; amortecedores de cisalhamento viscoelásticos usando um copolímero acrílico 3M como elemento dissipativo; ou dispositivos de memória de forma de liga de níquel-titânio que aproveitam as mudanças de fase reversíveis induzidas por estresse na liga para dissipar energia (AIKEN; NIMS; WHITTAKER; KELLY, 1993).

2.5.2 Controle ativo

O controle ativo depende da modificação ativa da massa, rigidez ou propriedades geométricas de uma estrutura durante sua resposta dinâmica, de forma a neutralizar e reduzir deslocamentos excessivos (LUCO; MITA, 1992). Amortecedores de massa (*tuned mass dampers*) e tensionamento ativo de tendões são métodos sob investigação investigado. A maioria dos métodos de controle ativo é em tempo real, contando com a medição da resposta estrutural e análise computacional rápidas (SCAWTHORN, 1999). Tendo realizado neste capítulo a revisão sobre os tópicos pertinentes ao trabalho, o capítulo seguinte traz o método utilizado para o estudo.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentado o principal método de investigação utilizado para realização da revisão de literatura, bem como suas delimitações e a ferramenta de análise desenvolvida para caracterização de revisões sistemáticas e integrativas de literatura.

A fim de realizar uma busca de fontes bibliográficas, foi utilizado um método proposto por Ferenhof e Fernandes (2016) no artigo publicado na Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina, em 2016, intitulado “Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: Método SSF (*Systematic Search Flow*)”. Os autores propõem um método para auxiliar na execução de revisões sistemáticas e integrativas baseado nos estudos que lidam com revisão de literatura, e a estruturação do método segue os princípios do livro “*Doing Your Literature Review – Traditional and Systematic Techniques*” de Jill K. Lesson, Lydia Matheson e Fiona M. Lacey.

3.1 TIPOS DE REVISÃO DA LITERATURA E BUSCA SISTEMÁTICA

Um das principais atividades para se aprofundar ou se atualizar quanto ao conhecimento científico que está sendo produzido sobre determinado tema é a revisão da literatura. Ela pode ser realizada de diversas formas e cada uma apresenta suas particularidades e objetivos específicos. Ferenhof e Fernandes (2016) a classificam em três tipos: revisão narrativa, revisão sistemática e revisão integrativa.

A revisão narrativa, também conhecida como busca exploratória, é considerada do tipo tradicional e não segue uma sistematização do processo de busca, ou seja, ocorre sem definição de critérios de busca e é feita de forma aleatória e sem preocupação com o volume e natureza das fontes de informação (CORDEIRO et. al, 2007).

As revisões sistemáticas de literatura se distinguem de revisões tradicionais ao adotar um método replicável, respeitando critérios científicos e transparentes de busca e seleção de fontes bibliográficas. Esse método fornece, portanto, uma alternativa aos pesquisadores para otimizar o processo de revisão, análise e conclusão de trabalhos baseados em revisão de materiais científicos (COOK; MULROW; HAYNES, 1997). Além disso, esse tipo de revisão da literatura apresenta algumas particularidades como, por exemplo, a necessidade de análise dos artigos por mais de um pesquisador, que discutem e definem critérios de inclusão e exclusão dos resultados de busca, e segue, portanto, um protocolo de pesquisa e uma síntese rigorosa de

todas as pesquisas relacionadas à uma questão científica (ESCOLE; MELO; ALCOFORDA, 2014).

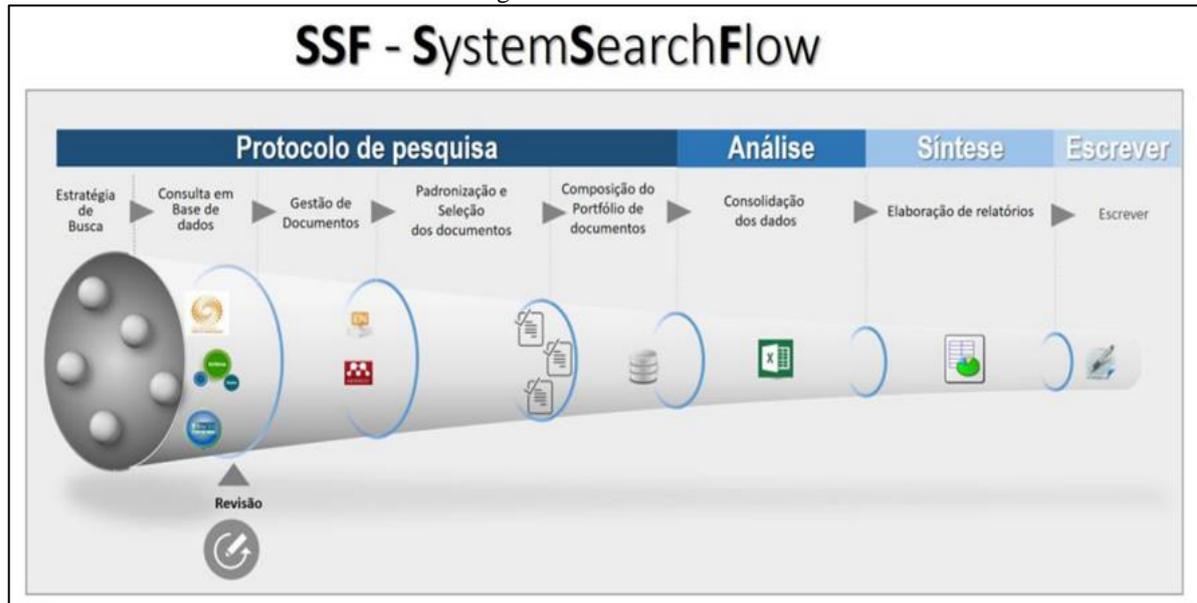
A organização e síntese dos principais resultados de uma pesquisa científica a partir de um tema delimitado, de forma ordenada sistemática e abrangente corresponde a uma revisão integrativa da literatura. Sua principal função é promover um aprofundamento maior do tema de investigação (ROMAN; FRIEDLANDER, 1998; ERCOLE; MELO; ALCOFORDA, 2014). Este tipo de revisão pode ser realizado por um pesquisador apenas e, portanto, será o método utilizado para a realização deste trabalho.

A busca sistemática é um método que está presente tanto na revisão sistemática quanto na revisão integrativa. Essa ferramenta de investigação científica tem como principal objetivo a eliminação de vieses provocado por pesquisas muito exaustivas na literatura de estudos publicados e não publicados por meio do planejamento de buscas em base de dados científicas e a organização dos principais resultados em um Portfólio Bibliográfico (FERENHOF; FERNANDES, 2014). Em outras palavras, a ferramenta de busca sistemática está presente na revisão sistemática e integrativa respeitando as especificidades de cada uma, a partir das estratégias definidas na etapa de planejamento da revisão de literatura.

3.2 Estrutura do método

O método SSF segue os seguintes princípios: estratégia; consulta em base de dados; organização das bibliografias, padronização e seleção dos artigos; composição do portfólio de artigos, consolidação de dados; síntese e elaboração de relatórios; e escrita. Esses princípios estão estruturados em 4 fases (FERENHOF e FERNANDES, 2016), e estão representados na Figura 19.

Figura 19 - Método SSF



Fonte: FERENHOF e FERNANDES (2016)

A metodologia utilizada está segmentada em 4 etapas: Protocolo de pesquisa (1), análise de documentos (2), síntese (3) e redação dos resultados (4).

3.2.1 Estratégia de busca

A primeira fase, fase 1, corresponde ao protocolo de pesquisa, dividida em 5 atividades interdependentes: definição da estratégia de busca (1); consulta em base de dados (2); gestão de documentos (3); padronização e seleção dos documentos (4); e composição do portfólio de documentos (5).

Na atividade de estratégia de busca, identifica-se a necessidade da revisão sistemática e avalia se o campo da temática já apresenta revisões pouco citadas ou estudos muito antigos e, em caso de identificação com o seguinte cenário, pressupõe-se a necessidade de realização de uma revisão sistemática. Além disso, nessa etapa de preparação, é importante delimitar o escopo da temática, qual a extensão da investigação científica, suas limitações e seus motivos (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

Nessa fase, é fundamental o conhecimento e o uso de operadores lógicos e operadores relacionais, que basicamente são ferramentas de configuração das operações de buscas nas bases de dados científicas. Para a realização deste trabalho, serão utilizados apenas operadores lógicos. Os principais operadores lógicos são:

1) AND (“E” Lógico) – tem como dados de saída resultados que contenham ambos termos pesquisados. Ex.: (revisão) AND (integrativa).

2) OR (“ou” lógico) – tem como dados de saída resultados que contenha um dos dois termos. Ex.: (revisão) OR (integrativa)

3) NOT (Negação lógica) – apresenta dados de saída contrários aos termos digitados. Ex.: (revisão) NOT (integrativa). Neste caso, não serão emitidos resultados com o termo ‘revisão’, somente resultado que contenham o termo ‘integrativa’.

Foi realizada uma pesquisa por monografias cujo assunto corresponde a revisões sistemáticas sobre soluções antissísmicas na biblioteca virtual do portal da CAPES no dia 01/10/2021 para investigar o conhecimento de revisões sistemáticas sobre o assunto central deste trabalho para avaliar a necessidade de realização da revisão de literatura. Com o uso das seguintes expressões “soluções antissísmicas”, “revisão sistemática de sistemas de proteção sísmica”, “revisão sistemática em engenharia sísmica”, não foram encontrados resultados relevantes. Logo, foi validada a necessidade de uma revisão pelo autor e prosseguiu-se com o método.

Em seguida, organizou-se o protocolo da revisão: quais bases de dados serão utilizados, os critérios de delimitação, escolha das bases dados, definição de palavras-chave, estratégias de busca e aplicação de filtros de pesquisa. Neste trabalho, foram definidas as seguintes características de busca:

- 1) Escolha de poucas palavras-chave, 4 a 7, a fim de evitar o uso de palavras-chave genéricas para evitar um volume de artigos que impossibilite a realização da revisão no prazo estabelecido;
- 2) Escolha de um banco de dados relevante; existem vários bancos de divulgação científica disponíveis, porém alguns deles são mais indicados para determinadas áreas, como, por exemplo, o PubMed®, banco de dados voltado para áreas da saúde. Neste trabalho, voltado para o curso de engenharia civil, a base de dados escolhidas foi a Scopus®.
- 3) Escolha de um banco de dados internacional para melhorar o alcance e relevância da pesquisa. Segundo a CAPES, a Scopus, base de dados da editora holandesa Elsevier, é a maior base de dados de citações e resumos de literatura revisada por pares, com mais de 22.000 títulos submetidos por mais de 5.000 editores em todo o planeta.

- 4) Conhecer as diferentes bases de dados existentes e as particularidades entre elas para evitar uma busca com duplicação de resultados. Por exemplo, uma busca de dados na ScienceDirect® e Scopus® produz resultados duplicados pois a base de dados ScienceDirect® é uma base de dados de revistas científicas da Elsevier, empresa dona da Scopus, base de dados que engloba informações da base ScienceDirect®.
- 5) Tempo de busca: documentos publicados entre os anos de 2017 e 2021, período de 5 anos.
- 6) Idioma dos documentos: inglês, português e espanhol.
- 7) Escolha dos tipos de documentos desejáveis: artigo científico.

Foram realizadas 3 buscas iniciais na plataforma Scopus por meio de “*Search queries*”, combinações de expressões alfanuméricas que direcionam a pesquisa com a aplicação dos critérios e filtros de pesquisa (GHS, 2021). Todas as tentativas foram realizadas no dia 23 de novembro de 2021.

Na primeira tentativa, foram aplicadas sete palavras-chave (*‘disaster proof’*, *‘earthquake proof structures’*, *‘seismic proof structures’*, *‘seismic protection’*, *‘antiseismic structural engineering’*, *‘earthquake engineering’*, *‘seismic engineering’*, *‘earthquake’*), apenas operadores lógicos do tipo OR e os filtros para busca de artigos científicos em inglês ou espanhol, e na área de estudo de engenharia nos últimos 5 anos. Esta tentativa teve como resultado um total de 14.410 documentos, um volume inviável de pesquisas para a realização deste trabalho.

Logo, foi realizada uma segunda tentativa de busca com a alteração de algumas palavras-chave e a retirada do filtro para resultados com idiomas em espanhol. As palavras-chave utilizadas foram *‘disaster proof’*, *‘earthquake proof’*, *‘seismic protection systems’*, *‘antiseismic protection systems’*, *‘earthquake engineering’* e *‘seismic engineering’*. Nesta tentativa, foram obtidos 2.499 documentos, um volume de documentos que também inviabilizaria a realização da revisão de literatura.

Por fim, na terceira tentativa, optou-se pela redução do número de palavras-chave e manutenção dos filtros de pesquisa aplicados na busca anterior. Nesta tentativa, utilizou-se as palavras-chave *‘disaster proof’*, *‘earthquake proof’*, *‘seismic protection system’* e *‘seismic engineering’*. A partir desta tentativa, foram encontrados 207 documentos, e que corresponde um volume de artigos considerado viável pelo autor para a realização da revisão de literatura.

Portanto, não foram realizadas tentativas adicionais de busca e esses documentos foram selecionados para a etapa de avaliação inicial dos resultados. O Quadro 1 representa as principais considerações na estratégia de busca na base dados Scopus. A Search query que traduz a terceira tentativa de busca, a partir dos filtros aplicados foi:

(TITLE-ABS-KEY ("disaster proof") OR TITLE-ABS-KEY ("earthquake proof") OR TITLE-ABS-KEY ("seismic protection system") OR TITLE-ABS-KEY ("seismic engineering")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))

Quadro 1 - Tentativas da Busca inicial de resultados

| Estratégia de Busca: Tentativa 1 | | | | | |
|----------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------|-------------|------------|
| TESTE | NATUREZA | PALAVRAS-CHAVE | OPERADORES LÓGICOS | FILTROS | RESULTADOS |
| 1 | TITLE-ABS-KEY | disaster proof | OR | ARTICLE | 14410 |
| | TITLE-ABS-KEY | earthquake proof structures | OR | ENGLISH | |
| | TITLE-ABS-KEY | seismic protection | OR | SPANISH | |
| | TITLE-ABS-KEY | antiseismic structural engineering | OR | 5 YEARS | |
| | TITLE-ABS-KEY | earthquake engineering | OR | ENGINEERING | |
| | TITLE-ABS-KEY | seismic engineering | | | |
| | TITLE-ABS-KEY | earthquake | | | |
| Estratégia de Busca: Tentativa 2 | | | | | |
| TESTE | NATUREZA | PALAVRAS-CHAVE | OPERADORES LÓGICOS | FILTROS | RESULTADOS |
| 2 | TITLE-ABS-KEY | disaster proof | OR | ARTICLE | 2499 |
| | TITLE-ABS-KEY | earthquake proof structures | OR | ENGLISH | |
| | TITLE-ABS-KEY | seismic protection systems | OR | 5 YEARS | |
| | TITLE-ABS-KEY | antiseismic structural engineering | OR | ENGINEERING | |
| | TITLE-ABS-KEY | earthquake engineering | OR | | |
| | TITLE-ABS-KEY | seismic engineering | | | |
| Estratégia de Busca: Tentativa 3 | | | | | |
| TESTE | NATUREZA | PALAVRAS-CHAVE | OPERADORES LÓGICOS | FILTROS | RESULTADOS |
| 3 | TITLE-ABS-KEY | disaster proof | OR | ARTICLE | 207 |
| | TITLE-ABS-KEY | earthquake proof | OR | ENGLISH | |
| | TITLE-ABS-KEY | seismic protection system | OR | 5 YEARS | |
| | TITLE-ABS-KEY | seismic engineering | OR | ENGINEERING | |

Fonte: Autor

Após a definição das estratégias de busca e a base de dados escolhida, realizou-se a avaliação dos resultados da busca inicial. Nesta etapa, há um volume de artigos inicial, 207 documentos, que passou por um processo de seleção por meio da leitura mais superficial, pelas seções que sintetizam o conteúdo dos artigos científicos: resumo, introdução e conclusão. Com a finalidade de se obter o conhecimento das principais soluções estruturais antissísmicas desenvolvidas internacionalmente, todos os artigos que não se relacionam diretamente com o objetivo geral deste trabalho foram descartados. Assim, os materiais que não compõem o portfólio de documentos foram descartados através de critérios de exclusão definidos pelo autor de forma qualitativa para avaliar a relevância dos resultados para a continuação do trabalho. O principal critério utilizado se relaciona com o assunto abordado pelo artigo científico. Dentre os 159 artigos descartados, destacam-se os principais assuntos que não atendem ao objeto de pesquisa:

- Abordagens teóricas para o desenvolvimento de algoritmos no campo da dinâmica estrutural;
- Propostas de modelos probabilísticos para análise de projeto e avaliação sísmica baseada em desempenho;
- Avaliação de risco probabilístico de terremotos em regiões sísmicamente ativas;
- Estudos experimentais para avaliação do comportamento mecânico e dinâmico de solos;
- Mapeamentos geográfico e hidrogeológico de risco sísmico;
- Estudos experimentais para avaliação de danos em estruturas existentes pós-terremoto;
- Estudos geofísicos sobre propagação de ondas em diferentes tipos de materiais;
- Avaliação de capacidade de carga de conexões estruturais;
- Desenvolvimento de sistemas de alerta e previsão sísmicos;
- Aquisições colaborativas de centros de pesquisa;
- e.

Assim, após a avaliação dos resultados, 48 artigos foram selecionados para compor o portfólio de documentos. Os critérios utilizados nesta fase para a inclusão dos artigos científicos ao portfólio são: aplicação prática da solução estrutural proposta; soluções estruturais em fase

avançada de estudo experimental; casos históricos investigado sob uma análise de desempenho antissísmico.

Em paralelo ao processo de revisão, foi feito o monitoramento e extração de dados da revisão sistemática. Esses dados foram organizados em planilha eletrônica para facilitar a manipulação de grande volume de dados. Neste momento, os resultados incluídos para a etapa seguinte passam pela etapa de análise. Os artigos selecionados para a revisão de literatura estão apresentados no apêndice A.

3.2.2 Análise dos documentos

A fase 2 ou fase de análise, corresponde à caracterização da natureza dos resultados da busca sistemática. Nesta fase, são descritas informações como número de publicações encontradas, distribuição geográfica das publicações, publicações mais citadas, obtenção de dados bibliométricos e identificação dos pontos fortes e pontos fracos da pesquisa, a fim de propor sugestões para futuras pesquisas (GANONG, 1987; MENDES; SILVEIRA; GALVÃO, 2008; BOTELHO; CUNHA; MACEDO, 2011). Neste trabalho, a etapa de análise está apresentada no capítulo 4.

3.2.2.1 Desenvolvimento de painel de indicadores como ferramenta de análise dos dados

A base de dados utilizada para a pesquisa permite a extração de várias informações a respeito dos resultados da busca. Os principais dados fornecidos são a respeito dos autores, código de identificação dos autores na plataforma, título, ano de publicação, país de publicação, fonte de publicação, volume, capítulo, número de páginas, número de citações, natureza do documento (artigo científico), endereço da instituição de pesquisa, idioma, entre outros. Estes dados foram exportados em formato de arquivo editável em planilhas eletrônicas como mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Planilha com dados bibliométricos extraídos da Scopus

| 1 | Authors | Author(s) ID | Title | Year | Source title | Volume | Issue | Art. No. | Page start | Page end | Page count | Cited by | DOI | Link | Correspondence Address | Language | Document Type | Open Ac. |
|----|-----------------|-------------------|----------|------|-------------------|--------|-------|----------|------------|----------|------------|----------|--------|---|--|----------|---------------|----------|
| 2 | Siregar A.H. | 57372029900 | Traditio | 2021 | Journal of Engine | 16 | 6 | | 4626 | 4637 | | | | https://Siregar, A.H.; Architecture Des | English | Article | | |
| 3 | Zhang C., Che | 8676162800;573476 | Weldin | 2021 | International Jou | 21 | 6 | | 2088 | 2100 | | | 10.100 | https://Zhang, C.; Jiangsu Key Laborat | English | Article | All Open | |
| 4 | Huang H., Wa | 5638552500;57226 | Damag | 2021 | Structures | 34 | | | 604 | 614 | | | 10.101 | https://A Li, Y.; School of Mechanics, C | English | Article | | |
| 5 | Huang C., Che | 57202538013;55359 | Compa | 2021 | Bulletin of Earth | 19 | 15 | | 6641 | 6667 | | | 10.100 | https://A Chen, L.; College of Civil Engin | English | Article | | |
| 6 | Grange S., Be | 24484583600;25821 | Implici | 2021 | Finite Elements | 196 | | 103604 | | | | | 10.101 | https://A Grange, S.; Univ Lyon, EA7495 | English | Article | | |
| 7 | Mogili S., Kua | 57204197332;71026 | Seismik | 2021 | Proceedings of tl | 174 | 11 | | 965 | 978 | | | 10.168 | https://A | English | Article | | |
| 8 | Arshadi H., R | 57198771282;24066 | High-st | 2021 | Proceedings of tl | 174 | 10 | | 873 | 884 | | | 10.168 | https://A Kheyroddin, A.; Department of | English | Article | | |
| 9 | Nahwina M.A | 57306264000;65070 | Load tr | 2021 | Proceedings of tl | 174 | 10 | | 885 | 899 | | | 10.168 | https://A Tasnini, A.A.; Department of | English | Article | | |
| 10 | Feng D.-C., C | 57200006945;57194 | Probal | 2021 | Journal of Engine | 147 | 10 | 04021066 | | | | | 2 | 10.106 | https://A Tacioglu, E.; Key Laboratory | English | Article | |
| 11 | Zhou X., Ke K | 52329134100;49961 | Shape i | 2021 | Thin-Walled Stru | 167 | | 108158 | | | | | 1 | 10.101 | https://A Ke, K.; School of Civil Engineer | English | Article | |
| 12 | Li H., Askari | 57210011152;25653 | A nove | 2021 | Structural Contr | 28 | 10 | e2810 | | | | | 10.100 | https://A Li, J.; School of Civil and Envir | English | Article | | |
| 13 | Rodriguez Val | 57275461900;56646 | Structu | 2021 | Proceedings of tl | 174 | 3 | | 120 | 135 | | | 10.168 | https://A Rodriguez Valenzuela, L.M.; U | English | Article | | |
| 14 | Chen Z., Fu J. | 55866149500;57262 | Baselin | 2021 | Sensors | 21 | 18 | 6283 | | | | | 10.339 | https://A Zhang, L.; School of Civil Engin | English | Article | All Open | |
| 15 | Arango-Serna | 57202577211;57196 | Use of | 2021 | Soil Dynamics an | 148 | | 106837 | | | | | 10.101 | https://A Arango-Serna, S.; School of C | English | Article | | |
| 16 | Nguyen D.-D. | 56941283500;55975 | Optimis | 2021 | Energies | 14 | 16 | 5163 | | | | | 10.339 | https://A Lee, T.-H.; Department of C | English | Article | All Open | |
| 17 | Lee C.-L., Che | 7410154699;353262 | Experir | 2021 | Proceedings of tl | 174 | 8 | | 670 | 684 | | | 10.168 | https://A Lee, C.-L.; School of Civil Engi | English | Article | | |
| 18 | Mislini M., Rir | 57188388200;57210 | Uigrac | 2021 | Proceedings of tl | 174 | 8 | | 655 | 669 | | | 10.168 | https://A Mislini, M.; Faculty of Civil Eng | English | Article | | |
| 19 | Ahmed M., S | 57092938200 | Evaluar | 2021 | Proceedings of tl | 174 | 8 | | 706 | 722 | | | 10.168 | https://A Ahmed, M.; Dar Engineering | English | Article | | |
| 20 | Liu D., Liu H. | 55967311600;57212 | Behavi | 2021 | Advances in Stru | 24 | 11 | 2427 | 2440 | | | | 10.117 | https://A Liu, H.; Jilin Jianzhu Universi | English | Article | | |
| 21 | Naem A., Kir | 57200037596;82856 | Seismik | 2021 | Structures | 32 | | 641 | 650 | | | | 2 | 10.101 | https://A Kim, J.; Department of C | English | Article | |
| 22 | Zhang A.-L., S | 23669425600;57222 | Cyclic l | 2021 | Structures | 32 | | 1 | 14 | | | | 10.101 | https://A Jiang, Z.-Q.; Key Laboratory of | English | Article | | |
| 23 | Sui L., Wu H. | 5720983060;44462 | Cyclic l | 2021 | Steel and Compc | 40 | 1 | | 1 | 12 | | | 10.129 | https://A Wu, H.; School of Civil Engin | English | Article | | |
| 24 | Forcellini D. | 56395498200 | Seismik | 2021 | Applied Sciences | 11 | 13 | 6117 | | | | | 10.339 | https://A Forcellini, D.; Dipartimento | English | Article | All Open | |
| 25 | Dolce M., Pro | 6603674721;660345 | Seismik | 2021 | Bulletin of Earth | 19 | 8 | | 2999 | 3032 | | | 26 | 10.100 | https://A Polese, M.; ReLUIS, Via Claudi | English | Article | All Open |
| 26 | Zhang Z., Li B. | 56303554500;56227 | Seismik | 2021 | Structural Engine | 78 | 3 | | 269 | 280 | | | 10.129 | https://A Li, B.; School of Civil and Envir | English | Article | | |
| 27 | Sakaba N., Ya | 57222081302;70051 | RESEAF | 2021 | International Jou | 20 | 81 | | 171 | 178 | | | 10.216 | https://A Sakaba, N.; Tokio Marine & N | English | Article | All Open | |
| 28 | Quintana Gall | 55151386100;57035 | On stal | 2021 | International Jou | 21 | 5 | 2171002 | | | | | 10.114 | https://A Quintana Gallo, P.; School of | English | Article | | |
| 29 | Aloisio A., Tot | 57205733998;55351 | Experir | 2021 | Soil Dynamics an | 143 | | 106616 | | | | | 10.101 | https://A Aloisio, A.; Department of C | English | Article | | |

Fonte: Scopus (2021)

Em seguida, o conjunto de dados foi estudado pelo autor para a escolha de dados relevantes para o processo de análise de dados (Figura 21). Para a organização dos dados, 3 etapas foram realizadas: manutenção parcial de dados extraídos da base de dados, exclusão de dados pouco relevantes para a pesquisa e implementação de novos dados referentes aos resultados de busca. Na implementação de novos dados, três colunas foram adicionadas à planilha eletrônica: “solução”, “solução detalhada” e “alvo”. A categoria de “solução” corresponde à natureza da solução antissísmica abordada no artigo científico, a “solução detalhada” corresponde a uma descrição detalhada da solução aplicada e, por fim, “alvo” corresponde a tipologia estrutural identificada na aplicação da solução antissísmica. Em suma, os dados manipulados nesta etapa foram:

- I. Dados mantidos: Título original, Título traduzido, ano de publicação, autores, Fonte de Publicação, número de citações, país de publicação.
- II. Dados excluídos: Endereço da instituição de pesquisa, idioma, natureza do documento, ID de identificação dos autores, número de páginas.
- III. Dados implementados: Alvo, solução e solução detalhada.

Figura 21 - Planilha manipulada pela seleção de dados

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
|----|---|---|-------------------|--|---|----------|----------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| # | Título Original | Título Traduzido | Ano de Publicação | Autor(es) | Journal | Citações | País | Alvo | Solução Detalhada | Solução |
| 1 | Performance and new design of a hybrid structural damper | Desempenho e novo conceito de projeto de amortecedor estrutural híbrido | 2017 | Wang, L., Li, Y., Salvi, J., Rizzi, E. | Journal of Earthquake Engineering and Earthquake Technology | 14 | China | resiliência estrutural e durabilidade | estruturas de madeira | Construções Históricas |
| 2 | FRP systems in strengthening of steel structure retrofitted using steel plate | Sistemas de FRP para fortalecimento de estruturas de aço usando placas de aço | 2017 | hemi, B.H., Moaddab, A., Eldin, M.N., Kim, M. | Journal of Steel Construction | 7 | Irã | estruturas metálicas | Amortecedores de Fricção | Dispositivos de Dissipação de Energia |
| 3 | Protection systems: A parametric study | Sistemas de proteção: Um estudo paramétrico | 2017 | Soul, H., Yawmy, A., Wang, Y., Peng, H., Lv, J. | Materials and Structures | 11 | Argentina | estruturas de concreto | superelásticos em sistemas de proteção | Dispositivos de Dissipação de Energia |
| 4 | Length eccentrically braced steel frames | Quadros de aço com brancos excêntricos | 2017 | Kaplan, K., Duan, L., Su, M. | Journal of Civil Engineering | 3 | Turquia | estruturas de concreto | Polímeros Reforçados com Fibras | Materiais Alternativos |
| 5 | Transfer of wide beam-column joints | Transferência de juntas de vigas largas | 2017 | Luk, S.H., Kuang, J.S., Awar, M.Y., Aleem, A. | Engineers' Journal | 8 | China | estruturas de concreto | Juntas Viga-Pilar | Peças & Conexões Estruturais |
| 6 | High-strength steel frame-infilled frames | Quadros de aço de alta resistência com preenchimento | 2017 | Chen, Y., Wang, Y., Chen, Y., Wang, W. | Journal of Civil Engineering | 5 | China | estruturas metálicas | compreendendo pórticos de HSS | Peças & Conexões Estruturais |
| 7 | Retrofitted slab-on-girder | Placa de concreto reforçada com aço | 2017 | Alshidi, M., Majid, T. | Journal of Civil Engineering | 1 | Irã | Pontes | Placa de enchimento de aço | Peças & Conexões Estruturais |
| 8 | Earthquake-Proof Solutions: Dampers | Soluções à prova de terremotos: Amortecedores | 2018 | h, S., Ruggieri, N., Pioldi, F., Rizzi, E., nayati, H., Zahrai, S. | Chief Architectural Engineer and Earthquake Engineering | 6 | Itália | estruturas de madeira | de Uso misto de Alvenaria e Madeira | Construções Históricas |
| 9 | Dampers to reduce seismic response | Amortecedores para reduzir a resposta sísmica | 2018 | h, S., Ruggieri, N., Pioldi, F., Rizzi, E., nayati, H., Zahrai, S. | Chief Architectural Engineer and Earthquake Engineering | 21 | Itália | estruturas de concreto | amortecedores de massa sintonizados | Dispositivos de Dissipação de Energia |
| 10 | Amortecedor para reduzir a resposta sísmica | Amortecedor líquido | 2018 | h, S., Ruggieri, N., Pioldi, F., Rizzi, E., nayati, H., Zahrai, S. | Chief Architectural Engineer and Earthquake Engineering | 1 | Irã | estruturas de concreto | Amortecedor Líquido | Dispositivos de Dissipação de Energia |
| 11 | Essential recycled aggregates for concrete | Argamassas recicladas para concreto | 2018 | M., Hu, G., Li, L., Filatroult, A. | Journal of Earthquake Engineering and Earthquake Technology | 8 | China | Sem Informação | Resizante de Fluido de espessamento | Isoladores Sísmicos |
| 12 | Rectangular concrete cross-sections | Seções retangulares de concreto | 2018 | Z., Gao, L., Wang, J. | Journal of Mechanics | 10 | Estados Unidos | estruturas de concreto | Concreto sísmico de piso com pneus reciclados | Isoladores Sísmicos |
| 13 | Steel-truss reinforced composite panels | Placas compostas reforçadas com treliças de aço | 2018 | Hu, Q., Zeng, J., Xiang, J. | Journal of Civil Engineering | 8 | China | estruturas de concreto | concreto reforçada com treliças | Peças & Conexões Estruturais |
| 14 | Strengthened by L-type P | Reforçada por painéis de parede em L | 2018 | S.K., Yu, S.Y., Kim, J. | Journal of Civil Engineering | 7 | Coreia do Sul | estruturas de concreto | concreto de concreto Pré-moldado tipo | Peças & Conexões Estruturais |
| 15 | Monry walls and shear walls | Paredes de cisalhamento e paredes de alvenaria | 2018 | ghadam, A.S., Ghafoor, H.S., Choi, S.W. | Journal of Civil Engineering and Earthquake Engineering | 2 | Irã | estruturas de alvenaria | Paredes de Cisalhamento | Peças & Conexões Estruturais |
| 16 | For steel moment resisting | Estruturas resistentes ao momento | 2018 | H.S., Choi, S.W. | Journal of Earthquake Engineering and Earthquake Technology | 1 | Coreia do Sul | estruturas de concreto | Retrofit sísmico | Peças & Conexões Estruturais |
| 17 | With SF-ED devices: Analytical | Dispositivos SF-ED: estudo analítico | 2019 | tić, J., Ristić, D., Gur, J. | Gradjevinarstvo | 2 | Macedônia | Pontes | Dispositivo de Rolamento Sísmico | Dispositivos de Dissipação de Energia |
| 18 | Residential buildings in de | Edifícios residenciais na base | 2019 | Jo, D., Spizzucchi, M. | Engineering Structures | 23 | Itália | estruturas de concreto | Isolamento de base | Isoladores Sísmicos |
| 19 | Hydromagnetic Isolators | Isoladores Hidromagnéticos | 2019 | Ding, L., Chen, J. | Vibrational Engineering | 11 | China | estruturas de concreto | Isolamento de base | Isoladores Sísmicos |

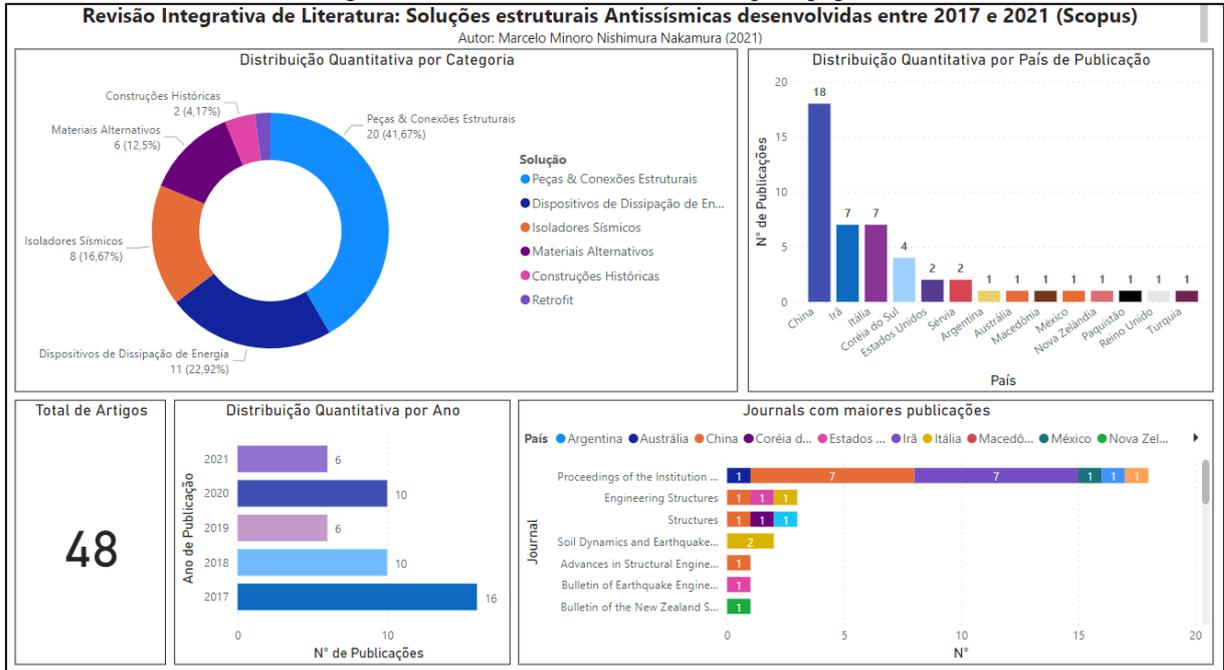
Fonte: Scopus (2021)

Após a manipulação dos dados, foi utilizado o software Microsoft Power BI para a criação da ferramenta de análise de revisão sistemática. De acordo com a Microsoft (2021) em seu site, o Power BI pode ser definido como:

(...) o Power BI é uma coleção de serviços de software, aplicativos e conectores que trabalham juntos para transformar suas fontes de dados não relacionadas em informações coerentes, visualmente envolventes e interativas. Os dados podem estar em uma planilha do Excel ou em uma coleção de data warehouses híbridos locais ou baseados na nuvem. (MICROSOFT, 2021).

Assim, com o auxílio do software MS Power BI, os dados da planilha eletrônica foram conectados ao programa. O serviço disponibiliza até trinta e seis visuais básicos de gráficos e, portanto, permite a criação de painéis de indicadores. Após a importação dos dados na plataforma, o software reconhece o agrupamento das informações por meio das colunas de dados. A criação de gráficos foi realizada por meio do cruzamento de diferentes de colunas e organizados na seção 'Relatórios' da plataforma (Figura 22, Figura 23, Figura 24). A interpretação dos resultados estão discretizadas no capítulo 4.

Figura 22 - Relatório de Análise da Pesquisa página 1



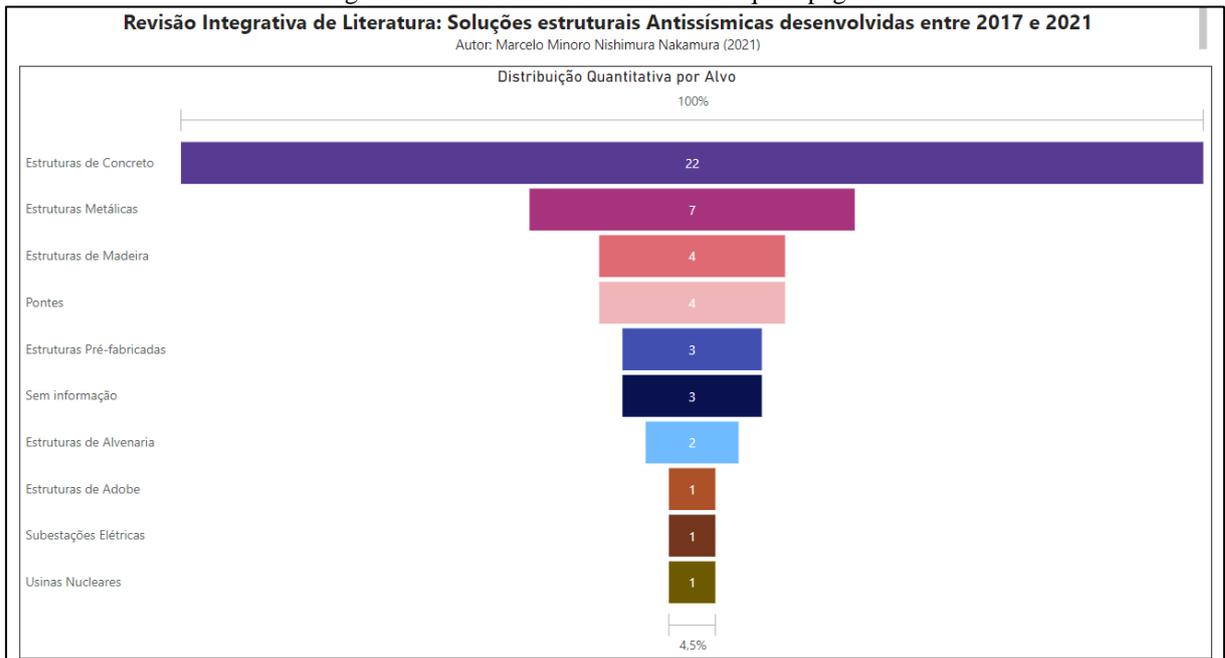
Fonte: MS Power BI (2021)

Figura 23 - Relatório de Análise da Pesquisa página 2



Fonte: MS Power BI (2021)

Figura 24 - Relatório de Análise da Pesquisa página 3



Fonte: MS Power BI (2021)

O painel de indicadores criado pelo autor pode ser utilizado como uma ferramenta de caracterização de revisões sistemáticas para outros trabalhos pois, uma vez que foi realizada a vinculação dos dados da planilha eletrônica no programa e a criação dos gráficos, não é necessário fazer novas vinculações para sua utilização.

Dessa forma, essa ferramenta criada só precisa ser alimentada com os dados de interesse uma única vez pois o processo de análise e organização dos resultados de busca já estão automatizados. Em caso de alteração dos dados, seja pela substituição, acréscimo ou exclusão de artigos, manipula-se a planilha eletrônica e, em seguida, na plataforma do MS Power BI, na seção 'Página Inicial', o comando 'Atualizar' realiza o processo de atualização dos dados e de todos os gráficos criados.

Figura 25 - Seção 'Página inicial' MS Power BI



Fonte: MS Power BI (2021)

3.2.3 Síntese

A fase 3, fase de síntese, é a fase em que as informações relativas à busca sistemática são condensadas. Neste momento, todos os materiais passaram pelos critérios de inclusão e serão analisados criticamente. É importante que nessa etapa seja avaliada as evidências práticas das principais soluções encontradas e seus desdobramentos (pontos fracos e pontos fortes). A realização desta etapa está descrita no capítulo 4.

3.2.4 Redação dos resultados

A última fase, fase 4, é a redação dos principais resultados obtidos por meio da revisão integrativa. As principais soluções são apresentadas neste trabalho no capítulo 4 e categorizadas por critérios de organização definidos pelo autor. Ademais, foi elaborado um resumo crítico, que sintetiza as principais informações dos artigos incluídos e a redação da conclusão, etapa que avalia a efetividade do trabalho em relação aos seus objetivos e a proposta de trabalhos futuros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a interpretação dos resultados encontrados por meio da revisão sistemática integrativa da literatura. Primeiramente, é apresentada uma visão geral sobre as soluções encontradas e a caracterização da pesquisa quanto a sua distribuição quantitativa geográfica e temporal, além da avaliação das principais fontes de publicação dos artigos e a aplicação das soluções encontradas em diferentes tipologias de sistemas estruturais. Em seguida, os estudos de caso são apresentados conforme categorização proposta pelo autor, discutidos e comparados para avaliação das principais vantagens e desvantagens proporcionadas por cada um. Ao final, soma-se ao capítulo as principais considerações acerca de propostas de trabalhos futuros.

4.1 VISÃO GERAL DA PESQUISA

A partir da busca sistemática, foram encontrados 208 artigos científicos na base dados Scopus que se enquadravam nos critérios de pesquisa através do método utilizado para a realização deste trabalho. Entretanto, ressalta-se a importância da aplicação de uma etapa adicional de análise para avaliar quais desses resultados estariam alinhados com os objetivos da pesquisa. Logo, a leitura das partes correspondentes à introdução, conclusão e resumo de todos os artigos foi realizada. Assim, a seleção final dos artigos resultou em 48 estudos de caso de aplicação de soluções estruturais antissísmicas em estruturas.

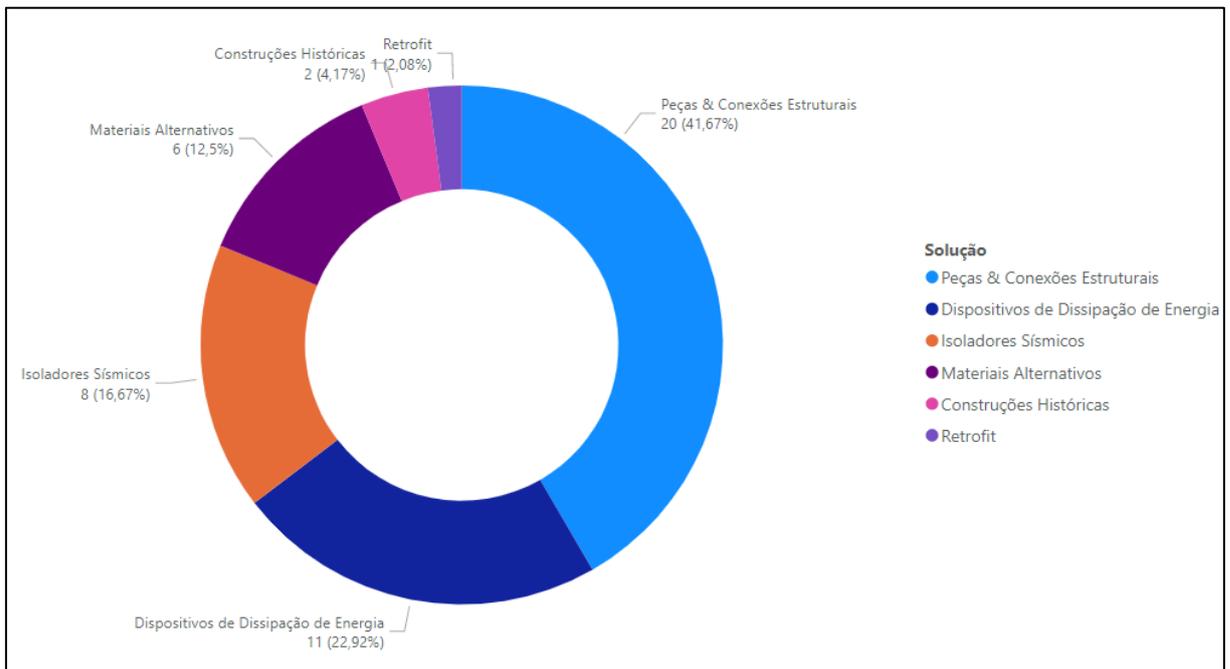
A fim de atender aos objetivos da pesquisa, os artigos que não foram selecionados nessa etapa correspondem a publicações das seguintes naturezas: estudos teóricos para avaliação de potencial sísmico de determinada região, estudos teóricos dos parâmetros de investigação de solos, estudos experimentais da dinâmica do solo, revisões de literatura, artigos científicos de acesso privado, avaliação econômica de desastres causados por eventos sísmicos e métodos computacionais para avaliação de esforços horizontais.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Os 48 estudos de caso envolvem aplicações distintas. As soluções encontradas foram discretizadas pelo autor em seis categorias: Peças e Conexões Estruturais, Dispositivos de Dissipação de Energia, Isoladores Sísmicos, Materiais Alternativos, Construções Históricas e

Retrofit. No Gráfico 1, mostra-se que as principais soluções desenvolvidas envolvem a atuação em sistemas estruturais (41,67%), seguida pela contribuição de dispositivos de dissipação de energia (22,92%), isoladores sísmicos (16,67%), uso de materiais alternativos (12,5%), construções históricas (4,17%) e *Retrofit* (2,08%). Esse cenário de baixa participação de soluções estruturais antissísmicas em construções históricas e *retrofit* pode ser interpretado como uma oportunidade para novos estudos envolvendo essas categorias.

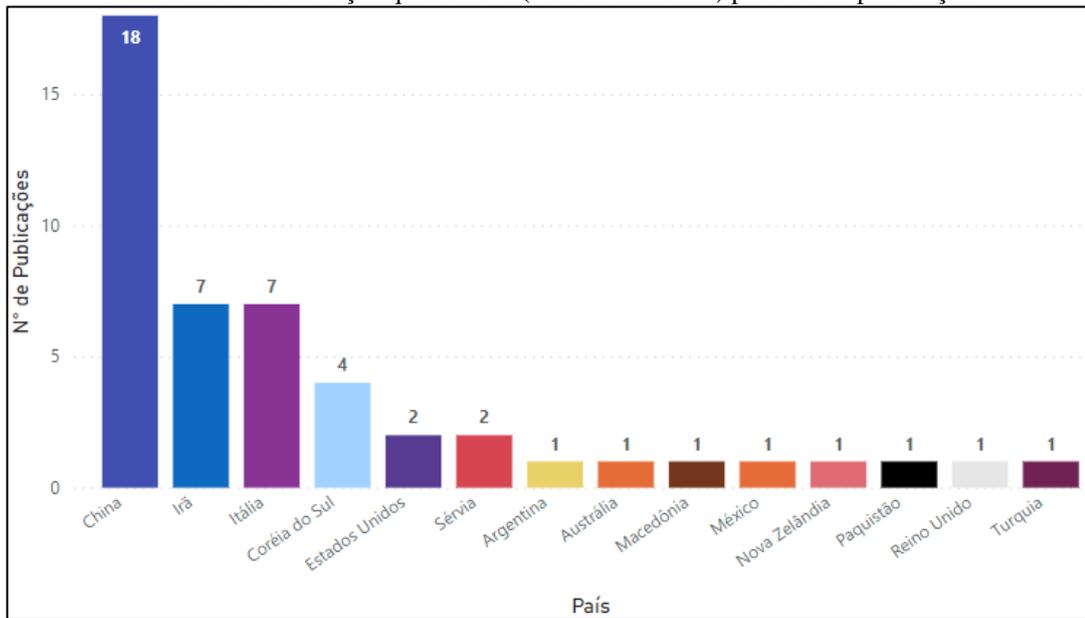
Gráfico 1 - Distribuição quantitativo por Categoria



Fonte: Scopus (2021)

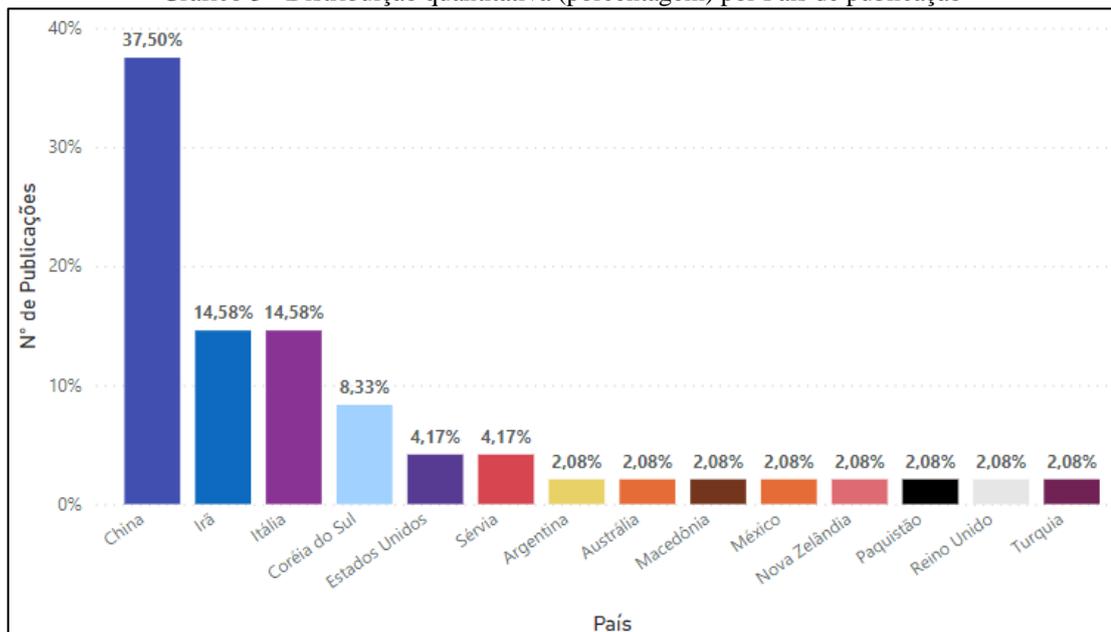
A partir das informações apresentadas no Gráfico 2 e no Gráfico 3, é possível identificar os países de publicação dos resultados da busca sistemática. Nota-se uma participação de países de todos os Continentes, exceto da África e da Antártica. Desta forma, surge um cenário de investigação para avaliar se há produção científica sobre o assunto nesses continentes realizados em anos anteriores ao período de pesquisa, avaliar a ocorrência de eventos sísmicos relevantes para populações humanas nessas regiões e o nível de desenvolvimento no cenário de mitigação de riscos sísmicos.

Gráfico 2 - Distribuição quantitativa (valores absolutos) por País de publicação



Fonte: Scopus (2021)

Gráfico 3 - Distribuição quantitativa (porcentagem) por País de publicação



Fonte: Scopus (2021)

A Figura 27 representa o mapa global de ameaça sísmica desenvolvido pela *Global Earthquake Model Foundation* (GEM) – Fundação Modelo de Terremoto Global, em português. A GEM é uma fundação sem fins lucrativos criada em 2009 que reúne dados padronizados de mais de 20.000 grandes terremotos nos últimos 110 anos, informações de 70.000 estações de GPS e sobre edifícios e infraestrutura em todo o mundo sobre

vulnerabilidade social e sísmica (ZAPATA; SCHNEIDER; PAGANI; SILVA, 2019). O Mapa global de ameaça sísmica representa a distribuição geográfica do PGA (peak ground acceleration) – aceleração de pico do solo, em português – ou seja, a intensidade da aceleração horizontal de uma região geográfica, com a probabilidade de 10% deste parâmetro ser igualado ou excedido num período de 50 anos. A escala de intensidade do mapa é representada por uma diferenciação a partir de tons quentes (maior intensidade) e tons frios (menor intensidade). Esta avaliação é um importante aspecto quantitativo no mapeamento de risco sísmicos.

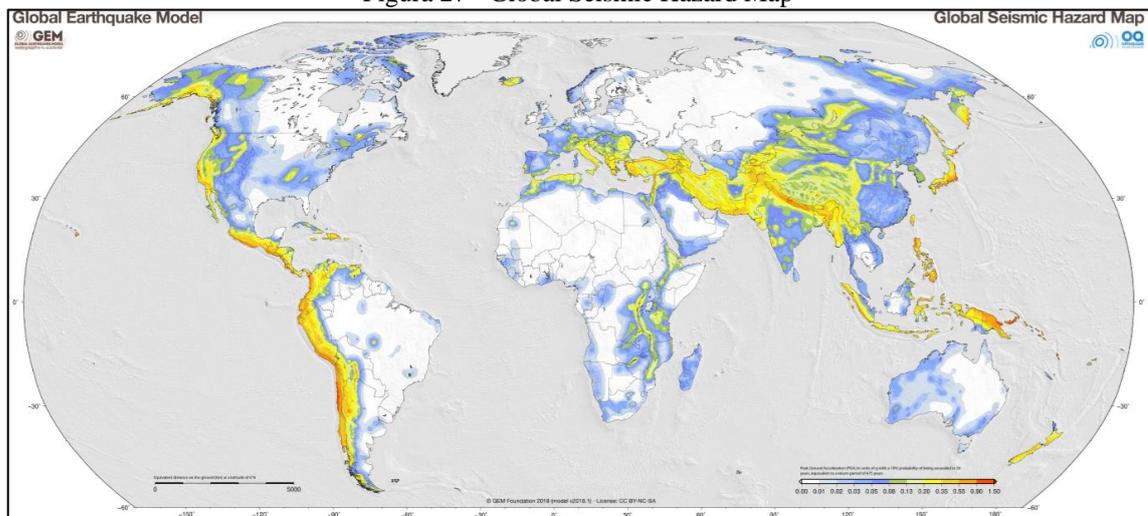
Através das Figura 26 e Figura 27, é apresentada a distribuição quantitativa e geográfica da pesquisa. É possível perceber que a maioria dos países avaliados na pesquisa se encontram em regiões de alta vulnerabilidade sísmica. Ou seja, é possível observar uma relação entre países sísmicamente vulneráveis e a realização de pesquisa em ciência e tecnologia para soluções antissísmicas.

Figura 26 - Distribuição geográfica e quantitativa dos resultados



Fonte: Scopus (2021)

Figura 27 - Global Seismic Hazard Map



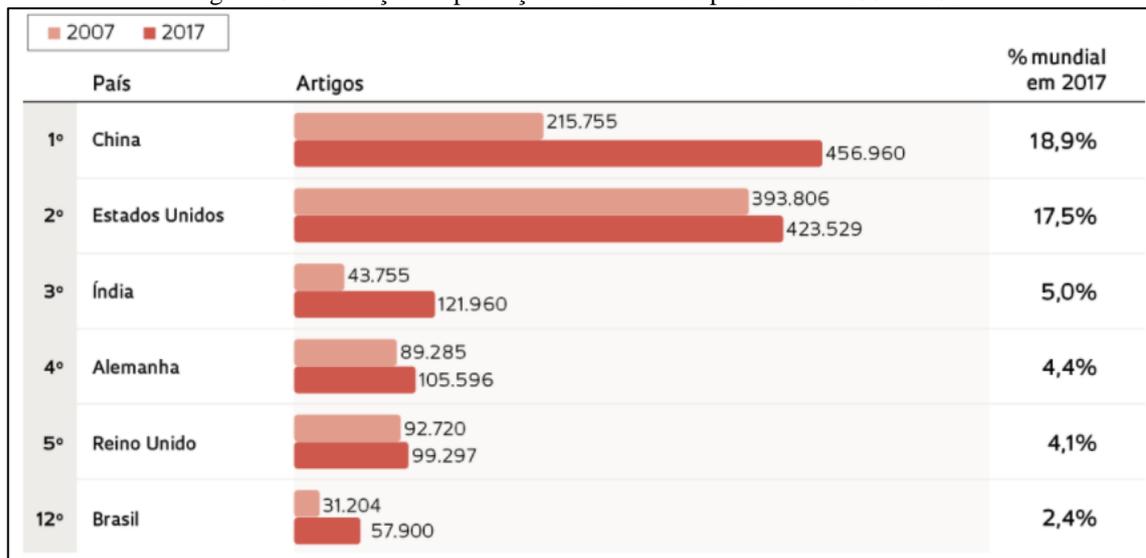
Fonte: GEM (2019)

Segundo Gonçalves (2010), desastres podem ser considerados eventos que provocam perdas, danos e paralisação temporária de certas áreas e atingem uma parcela considerável da população. A gestão de riscos surge nesse contexto como um conjunto de medidas para atenuar os perigos e as vulnerabilidades como forma de diminuir os impactos causados por desastres. Uma das fases da gestão de risco é a fase pré-desastre, composta por elementos como identificação e mitigação dos riscos, transferências dos riscos e prevenção. Exige-se nessa fase um conjunto de medidas para aumentar o conhecimento científico sobre os desastres, patrocinando estudos e pesquisas para construção de um conjunto de dados relevantes para a criação de sistemas eficientes de prevenção de desastres (GONÇALVES, 2010). A produção científica voltada para tecnologias antissísmicas pode ser considerada uma medida de pré-desastre e representa uma necessidade relevante por parte de países que se situam em regiões sismicamente ativas.

A partir das informações do Gráfico 2 e do Gráfico 3, é possível observar que a produção científica no âmbito da pesquisa é liderada pela China (37,50%), seguida pela igual participação do Irã (14,58%) e da Itália (14,58%). Informações relativas à produção científica no mundo são divulgadas anualmente pela plataforma Scimago, que reúne métricas de periódicos de bases de dados científicos mais usados no mundo. Segundo a plataforma, os Estados Unidos lideram a produção científica mundial de todos os documentos produzidos entre 1996 a 2019, responsável pela produção de 29% do volume total. Entretanto, dados interessantes mostram grande avanço da produção científica realizada na China nos últimos anos. Segundo dados coletados pela National Science Foundation, no ano de 2017, a China foi

responsável por 18,9% (456.960) da produção científica mundial por meio de artigos, livros e resumos de conferências em ciência e engenharia, superando os Estados Unidos, que representou 17,5% da produção naquele ano. Além disso, em 2020, um levantamento inédito realizado pela Folha de São Paulo, através da Scimago, mostrou que a China ocupou a posição de país com maior produção científica mundial, totalizando 788 mil publicações científicas contra 767 mil artigos dos Estados Unidos (Figura 28).

Figura 28 - Evolução da produção científica nos países entre 2007 e 2017



Fonte: NSF (2017)

O país tem investido consideravelmente em universidades chinesas de excelência em pesquisa, promovido a internacionalização do ensino superior com envio de estudantes para o exterior, que retornam ao país com fluência no inglês, contribuindo com o aumento da produção científica no país e desenvolvido políticas de promoção e aumento de salário relacionadas a produção científica (ABDENUR, 2019). Diante desse cenário, é possível compreender o impacto da produção científica chinesa nessa pesquisa, pois ela pertence a área de ciência e engenharia e está compreendida entre 2017 e 2021, num período em que a China apresentou grandes avanços em sua produção científica mundial.

Na Figura 29, é possível identificar quais foram os dez artigos com maior número de citações. Em primeiro lugar, o artigo “Rolamentos reforçados com fibra de borracha reciclada (RR-FRBs) como isoladores de base para edifícios residenciais em países em desenvolvimento: O edifício de demonstração de Pasir Badak, Indonésia”, produzido na Itália, apresentou um total de 23 citações. Todas as publicações tiveram ao menos 10 citações em outros documentos científicos. A partir do quadro, é possível identificar alguns aspectos relevantes. Conforme foi

mostrado no Gráfico 2 e Figura 29 - Top 10 publicações com maior número de citações, a China apresentou importante volume de produção científica para essa pesquisa, com um total de 18 publicações (37,5% do volume total), mas a Itália, por outro lado, apresentou uma relevância maior quando se analisa o impacto da produção destes artigos científicos. A Itália teve 4 dos seus artigos ocupando espaço dentre as cinco publicações com mais citações.

Figura 29 - Top 10 publicações com maior número de citações

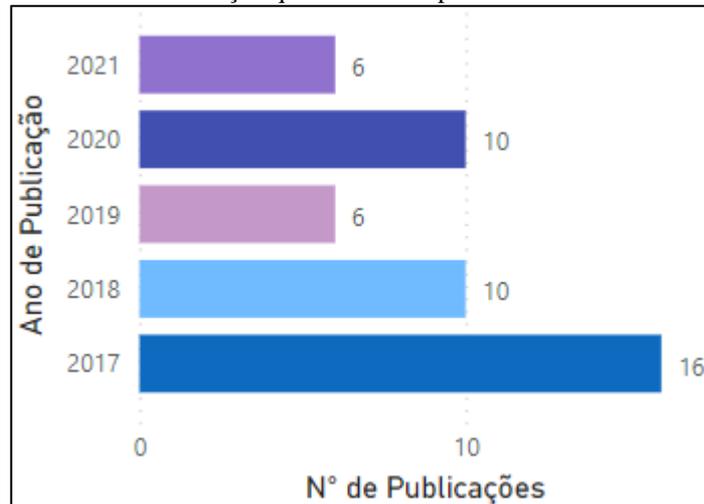
| País | Citações | Título Traduzido |
|---------------|----------|--|
| Itália | 23 | Rolamentos reforçados com fibra de borracha reciclada (RR-FRBs) como isoladores de base para edifícios residenciais em países em desenvolvimento: O edifício de demonstração de Pasir Badak, Indonésia |
| Itália | 21 | Amortecedores de massa otimizados sob interação sísmica solo-estrutura |
| Coréia do Sul | 19 | Avaliação do desempenho sísmico de uma estrutura adaptada usando amortecedores de fenda de aço com barras de liga com memória de forma |
| Itália | 14 | Rolamentos reforçados com fibra de borracha natural e reciclada para isolamento de base: revisão dos resultados experimentais |
| Itália | 14 | TMDs otimizados para terremotos: desempenho sísmico e novo conceito de projeto de equilíbrio de massas modais efetivas de divisão |
| China | 12 | Testes de carregamento cíclico de junta cruzada pré-fabricada resiliente a terremotos com placa de cobertura de flange única |
| Argentina | 11 | Aplicabilidade de materiais superelásticos em sistemas de proteção sísmica: Um estudo paramétrico de desempenho no isolamento de estruturas |
| China | 11 | Estudo Experimental de Isoladores Hidromagnéticos Deslizantes para Proteção Sísmica |
| China | 10 | Colunas de concreto retangulares reforçadas com polímero de fibra de vidro sob cargas sísmicas simuladas |
| China | 10 | Teste sísmico de estruturas de aço de alta resistência reforçadas excêntricamente com uma estrutura vertical |

Fonte: Scopus (2021)

Com o auxílio dessa análise, é possível ir além do volume de artigos produzidos e avaliar qual a relevância e o impacto destes documentos. Ademais, não foi possível observar a predominância de uma categoria específica no gráfico, no entanto é possível observar que o artigo “Rolamentos reforçados com fibra de borracha reciclada (RR-FRBs) como isoladores de base para edifícios residenciais em países em desenvolvimento: O edifício de demonstração de Pasir Badak, Indonésia” (1ª posição) e o artigo “Rolamentos reforçados com fibra de borracha natural e reciclada para isolamento de base: revisão dos resultados experimentais” (4ª posição) ambos estão bem colocados nesse gráfico e trazem a aplicação de fibra de borracha ciclada como tecnologia para estruturas antissísmicas. Tal aspecto pode indicar uma relevância de discussão e estudos sendo realizados com essa tecnologia.

No Gráfico 4, encontra-se a distribuição quantitativa da pesquisa ao longo do período de 2017 a 2021. Observa-se que a produção científica apresentou publicação acentuada no ano de 2017 (16) e diminui nos anos seguintes com uma média de publicação de 8 publicações médias anuais nos 4 anos seguintes.

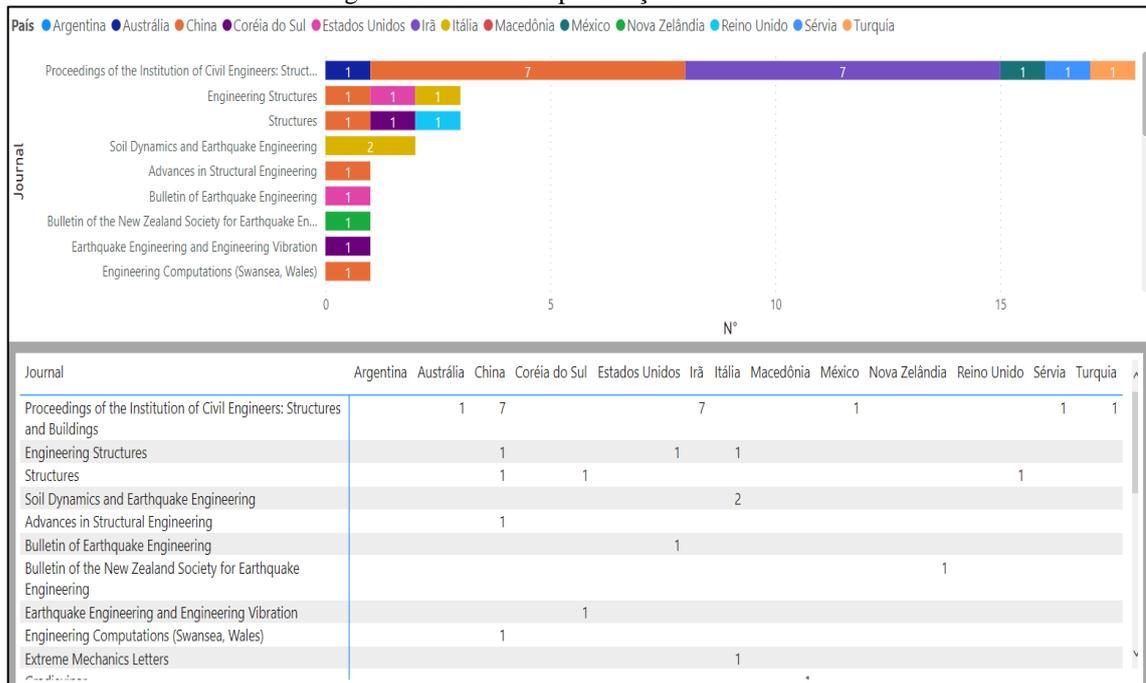
Gráfico 4 - Distribuição quantitativa no período entre 2017 e 2021



Fonte: Scopus (2021)

Na Figura 30, estão representados os principais veículos de publicação dos artigos. É possível perceber uma relevância do Journal “*Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*”, com a participação de 17 artigos publicados quando comparados com os Journals de segunda (*Engineering Structures*) e terceira posição (*Structures*), respectivamente e com 3 publicações cada. *Structures and Buildings* publica artigos revisados por pares em pesquisa acadêmica, juntamente com projeto prático e construção de estruturas de engenharia civil (edifícios, pontes, barragens, etc.) resistentes a cargas estática e dinâmica de curto e longo prazo (incluindo sísmica) (ICE, 2022). Este jornal mensal dá as boas-vindas a investigações experimentais e numéricas combinadas sobre o comportamento de componentes estruturais e sistemas compreendendo várias combinações de aço, concreto, madeira, polímeros reforçados com fibras (FRPs), materiais de base biológica, vidro e outros materiais de construção (ICE, 2022). Um dado interessante é que o volume total de artigos produzidos pelo Irã nessa pesquisa corresponde a 100% das publicações realizadas pelo país neste jornal. Ademais, este Journal representa o principal veículo de publicação científica realizada pela China nesta pesquisa, responsável pela publicação de 7 de seus artigos (38,88%).

Figura 30 - Fontes de publicação dos resultados



Fonte: Scopus (2021)

4.3 SOLUÇÕES ENCONTRADAS

4.3.1 Isoladores sísmicos

A Tabela 4 apresenta os principais resultados categorizados na solução isoladores sísmicos, em ordem crescente de ano de publicação.

Tabela 4 - Resultados categorizados na solução Isoladores Sísmicos

| Nº | Título Original | Ano de Publicação | Autor(es) |
|----|---|-------------------|---|
| 20 | Development and theoretically evaluation of an STF–SF isolator for seismic protection of structures | 2018 | Wei, M., Hu, G., Li, L., Liu, H. |
| 21 | Seismic floor isolation using recycled tires for essential buildings in developing countries | 2018 | Morales, E., Filiatrault, A., Aref, A. |
| 28 | Recycled Rubber Fiber Reinforced Bearings (RR-FRBs) as base isolators for residential buildings in developing countries: The demonstration building of Pasir Badak, Indonesia | 2019 | Calabrese, A., Losanno, D., Spizzuoco, M., Strano, S., Terzo, M. |
| 29 | Experimental Study of Sliding Hydromagnetic Isolators for Seismic Protection | 2019 | Peng, Y., Ding, L., Chen, J., Villaverde, R. |
| 32 | Innovative seismic resistant structure of shield building with base isolation and tuned-mass-damping for AP1000 nuclear power plants | 2019 | Hou, G., Li, M., Hai, S., Song, T., Wu, L., Li, Y., Zheng, G., Shen, F., Chen, Y. |

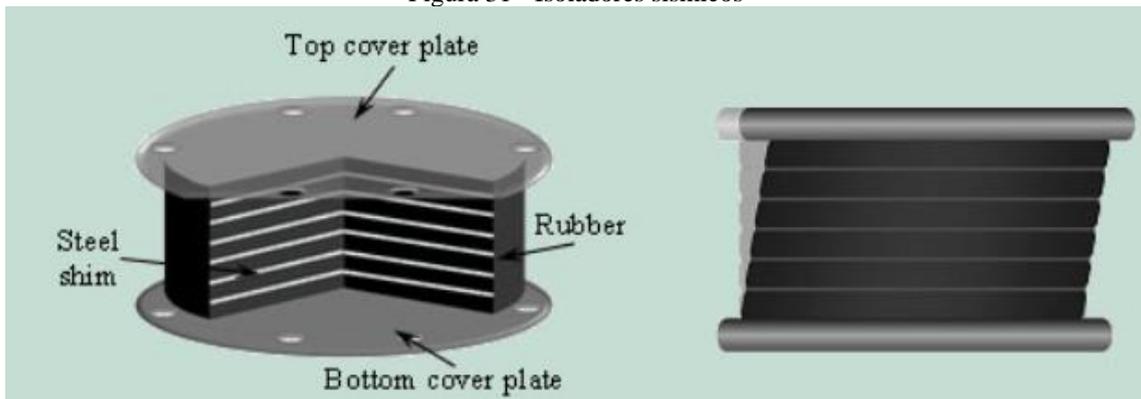
| | | | |
|----|--|------|--|
| 34 | A seismic-shielding structure based on phononic crystal | 2020 | Wang, J. |
| 35 | Effects of the long-term aging of glass-fiber reinforced bearings (FRBs) on the seismic response of a base-isolated residential building | 2020 | Calabrese, A., Losanno, D., Barjani, A., Spizzuoco, M., Strano, S. |
| 36 | Recycled versus Natural-Rubber Fiber-Reinforced Bearings for Base Isolation: Review of the Experimental Findings | 2020 | Losanno, D., Calabrese, A., Madera-Sierra, I.E., Spizzuoco, M., Marulanda, J., Thomson, P., Serino, G. |

Fonte: Scopus (2021)

O isolamento de base consiste no amolecimento da capacidade de cisalhamento da ligação de uma estrutura com o solo, mantendo a capacidade de carga vertical, de modo a reduzir a transmissão de carregamento provenientes do terremoto para a estrutura. Isso tem sido realizado principalmente através do uso de vários tipos de borracha, borracha de chumbo, composto de borracha-aço ou outros tipos de rolamentos sob as colunas. Os principais aspectos da maioria dos sistemas de isolamento de base desenvolvidos até hoje são: (1) eles são economicamente limitados a classes selecionadas de estruturas (não muito altas ou baixas); (2) eles exigem despesas de fundação adicionais, incluindo tratamento especial de linhas de serviço público; e (3) requerem um certo “espaço de chocalho” ao redor da estrutura, para acomodar os deslocamentos adicionais que os rolamentos sofrerão. Para novas estruturas, esses requisitos não são especialmente onerosos, e várias novas estruturas no Japão e algumas em outros países foram projetadas para isolamento de base (KELLY; WAY, 1991).

Nos últimos anos, o isolamento de base tornou-se a técnica estrutural cada vez mais aplicada para edifícios e pontes em áreas de alta sismicidade. Um número significativo de dispositivos de isolamento de base foi desenvolvido recentemente, a maioria deles usando mancais de isolamento de borracha ou neopreno. O rolamento de borracha de chumbo é feito de uma camada de borracha intercalada com camadas de aço. Um plugue de chumbo sólido está localizado no meio do rolamento. O rolamento é equipado com placas de aço superiores e inferiores que são usadas para fixá-lo à superestrutura do edifício e à fundação, respectivamente. O rolamento é muito rígido e forte na direção vertical, mas flexível na direção horizontal (Figura 31). As camadas de borracha permitem que o isolador se desloque facilmente para os lados, dissipando a energia sísmica e reduzindo as cargas sísmicas. Eles também atuam como uma mola, garantindo que a estrutura retorne à sua posição original após o término dos movimentos do solo (GIONCU; MAZZOLANI, 2011).

Figura 31 - Isoladores sísmicos



Fonte: Jangid (2013)

Três tipos de sistemas de isolamento são amplamente utilizados na prática de engenharia: mancais de elastômeros laminados (BRAGA; LATERZA, 2004), mancais deslizantes (DOLCE et al. 2007) e mancais de pêndulo de fricção (DICLELI; MANSOUR, 2003). Esses sistemas de isolamento têm sido amplamente aplicados a edifícios-chave, como hospitais e usinas nucleares em áreas sísmicas de alta intensidade (HOUSNER; MASRI, 1994; MEDEL-VERA; JI, 2015).

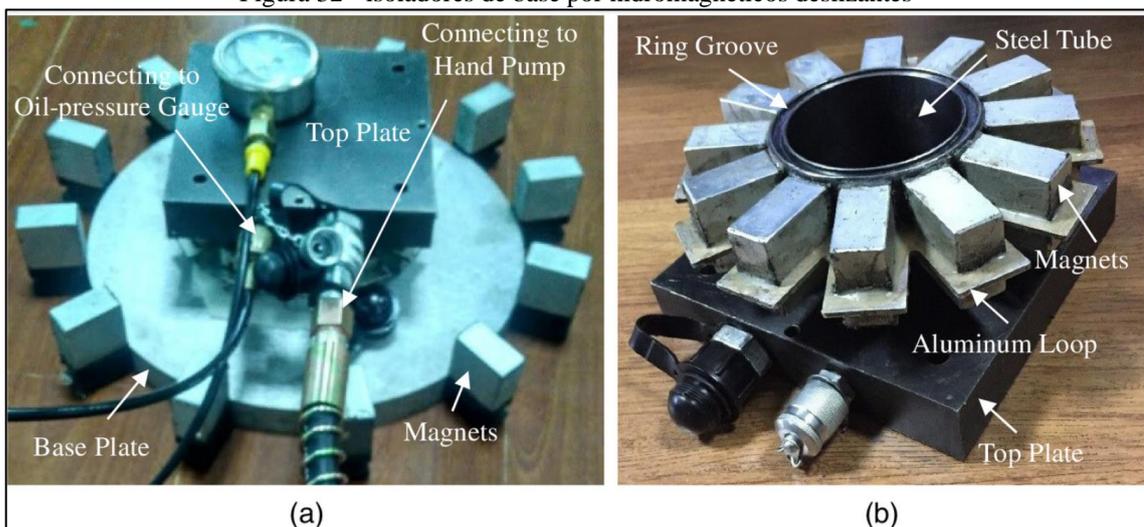
4.3.1.1 Isoladores de base por rolamentos hidromagnéticos deslizantes

Um novo sistema de isolamento de base que usa rolamentos hidromagnéticos deslizantes foi proposto por Peng, Ding, Chen e Villaverde (2021). Esses rolamentos são compostos por tubos de aço com fluido interno pressurizado e ímãs permanentes acoplados, e deslizam sobre placas de base de alumínio também com ímãs permanentes acoplados. Eles minimizam o atrito entre os rolamentos e as placas de base, geram uma força de amortecimento que reduz os deslocamentos dos rolamentos a níveis práticos e introduzem uma força restauradora e uma restrição de deslocamento. No estudo, um isolador hidromagnético deslizante é projetado, fabricado e testado experimentalmente para avaliar seu desempenho como sistema de proteção sísmica. Recentemente, um novo sistema de isolamento de base baseado no uso de mancais hidromagnéticos deslizando sobre placas de base circulares de alumínio e ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro sinterizados foi proposto (VILLAVARDE, 2017).

Os mancais hidromagnéticos compreendem um tubo de aço com um fluido interno de baixa viscosidade sob pressão vedado por um *O-ring* elastomérico e uma tampa de aço. Os ímãs

permanentes são fixados ao redor do tubo de aço e ao redor da borda das placas de base. O fluido pressurizado contido nos tubos de aço serve para suportar a maior parte da carga vertical aplicada a um mancal e, assim, minimizar o atrito entre o mancal e a placa de base. Os ímãs presos aos tubos de aço geram um campo magnético no espaço circundante com uma intensidade que muda à medida que os tubos deslizam para frente e para trás sobre as placas de alumínio (Figura 32). Este campo magnético variável, por sua vez, induz correntes elétricas parasitas na placa de alumínio e uma força de amortecimento que proporciona um mecanismo de dissipação de energia e diminui os deslocamentos dos rolamentos. Além disso, como dois ímãs permanentes se repelem se seus polos semelhantes estiverem voltados um para o outro, os ímãs da placa de base repelem os ímãs do tubo e produzem uma força contrária que empurra os rolamentos de volta para suas posições iniciais (PENG; DING; CHEN; VILLAAVERDE, 2021).

Figura 32 - isoladores de base por hidromagnéticos deslizantes



Fonte: Peng, Ding, Chen e Villaverde (2017)

Os rolamentos hidromagnéticos deslizantes oferecem assim vários benefícios técnicos: (a) redução do atrito entre os rolamentos e as placas de base; (b) redução dos deslocamentos dos rolamentos a níveis práticos; (c) restaurar as forças que empurram os mancais de volta para suas posições iniciais; e (d) uma restrição de deslocamento que impeça que os mancais deslizem de suas placas de base no caso de terremotos severos.

4.3.1.2 Isolamento sísmico de piso usando pneus reciclados para edifícios essenciais em países em desenvolvimento

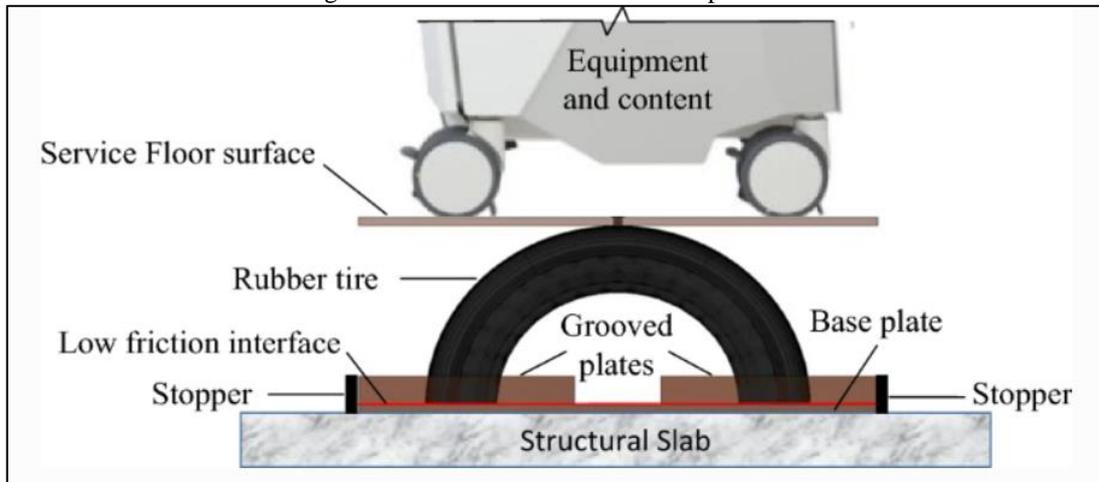
Terremotos históricos em países em desenvolvimento, particularmente na América do Sul, causaram efeitos devastadores em edifícios essenciais, como hospitais. Como resultado, alguns *retrofits* estruturais e novos projetos de instalações essenciais em países da América do Sul concentraram-se em aumentar as forças de projeto sísmicas além do que normalmente é exigido pelos códigos de construção. Essa abordagem de maior resistência pode levar a uma resposta estrutural quase elástica durante terremotos com acelerações de piso induzidas muito maiores do que o esperado de estruturas projetadas por código (MORALES; FILIATRAULT; AREF; 2018).

Sistemas de proteção sísmica passiva, como isolamento sísmico, fornecem um meio prático de controlar a demanda sísmica e agora são comuns em países desenvolvidos. No entanto, as aplicações de sistemas de proteção têm sido muito menores nos países em desenvolvimento devido a considerações econômicas e falta de conhecimento técnico. Este artigo apresenta os estudos experimentais e numéricos que apoiam o desenvolvimento de um novo sistema de proteção sustentável de baixo custo incorporando pneus de automóveis reciclados para isolar pisos ou salas designadas em edifícios essenciais em países em desenvolvimento. A principal inovação do sistema de isolamento de piso proposto é o arranjo geométrico dos pneus de borracha que permite o isolamento tanto das acelerações horizontais quanto verticais do piso (MORALES; FILIATRAULT; AREF; 2018).

O sistema de isolamento de piso proposto, aqui referido como o sistema *Recycled Tire Bearing* (RTB), consiste na inserção de pneus reciclados cortados em seu diâmetro entre a laje estrutural de uma sala de missão crítica designada e uma superfície de piso de serviço. Os pneus são comprimidos sob as cargas de gravidade estática da superfície do piso de serviço e outros equipamentos e conteúdo da sala. Este arranjo geométrico dos pneus de borracha permite o isolamento sísmico das acelerações horizontais e verticais do piso (MORALES; FILIATRAULT; AREF; 2018).

O sistema de isolamento de piso RTB proposto consiste em pneus de borracha de automóveis reciclados cortados em seu diâmetro e inseridos entre a laje estrutural de uma sala designada e uma superfície de piso de serviço, conforme ilustrado na Figura 33.

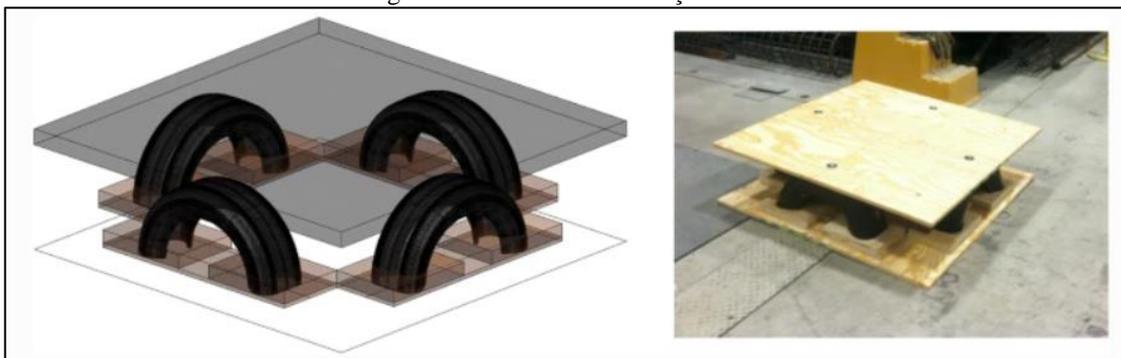
Figura 33 - Sistema de isolamento de piso RTB



Fonte: Morales, Filiatrault e Aref (2018)

Para garantir uma resposta estável nas direções vertical e plana, o sistema RTB é montado em uma configuração quadrada usando quatro semi-pneus, criando assim um bloco de construção RTB, conforme ilustrado na Figura 34. Uma sala completa seria isolada por vários blocos de construção RTB. Potenciais vibrações perturbadoras causadas pelo sistema RTB durante a operação normal da sala isolada podem ser mitigadas usando um mecanismo de travamento vertical (por exemplo, parafusos) entre a laje inferior e a superfície do piso. Este mecanismo de travamento, atuando como um fusível estrutural, pode ser projetado para falhar em acelerações horizontais e/ou verticais predeterminadas para ativar o sistema RTB no caso de um terremoto.

Figura 34 - Bloco de construção RTB



Fonte: Morales, Filiatrault e Aref (2018)

4.3.1.3 Rolamentos reforçados com fibra de borracha reciclada (RR-FRBs) como isoladores de base para edifícios residenciais em países em desenvolvimento: O edifício de demonstração de Pasir Badak, Indonésia

A borracha reciclada é comumente adotada para a fabricação de tapetes antivibratórios na engenharia ferroviária. Estes são obtidos a partir de pneus inservíveis ou sobras industriais (como as sobras do Monômero Etileno-Propileno Dieno, um elastômero utilizado para a produção de uma ampla variedade de vedações e gaxetas).

Este artigo contém os resultados de um estudo sobre a aplicabilidade de RR-FRBs como isolantes de base de edifícios residenciais. Os RR-FRBs são feitos usando uma borracha como o Tire Derived Material (TDM). Este material é obtido por prensagem a frio ou forjamento a quente de grânulos de borracha de pneus inservíveis e um aglutinante de poliuretano em um molde. O TDM é então ligado às camadas de fibra usando o mesmo aglutinante e prensagem a frio. Fibras de vidro ou carbono são geralmente adotadas como reforços para a fabricação de RR-FRBs. A borracha reciclada é de baixo custo e ecologicamente correta, pois pneus esgotados estão disponíveis em todos os lugares, constituem um problema ambiental e seu número está aumentando drasticamente ao longo dos anos [20]. Como resultado, os RR-FRBs são baratos: o custo de produção dos rolamentos em escala real descritos neste estudo foi de cem euros por peça. Trata-se de um custo muito baixo quando comparado com o custo de produção dos dispositivos convencionais de borracha que podem rondar os milhares de euros por peça (CALABRESE; LOSANNO; SPIZZUOCO; STRANO; TERZO, 2019).

Os RR-FRBs em escala real mostraram características de dissipação de energia semelhantes às dos rolamentos de borracha natural de alto amortecimento. Os resultados mostraram que os RR-FRBs podem ser uma excelente tecnologia para proteger edifícios de fortes terremotos. Eles são capazes de reduzir o cisalhamento de base, os desvios entre andares e as acelerações do piso. Ademais, os pesquisadores conseguiram mostrar através de análises o bom desempenho desses rolamentos em termos de prevenção de colapso e redução de danos a elementos estruturais e não estruturais de uma edificação após grandes terremotos. O desempenho dos RR-FRBs geralmente é tão bom quanto o dos dispositivos convencionais. Dada a resposta de amolecimento dos RR-FRBs, pode-se esperar uma grande deformação residual após abalos sísmicos, e uma construção isolada de base sobre esses rolamentos pode

exigir a rescentralização após uma grande ventilação (CALABRESE; LOSANNO; SPIZZUOCO; STRANO; TERZO, 2019).

4.3.2 Dispositivos de Dissipação de Energia

A Tabela 5 apresenta os principais resultados categorizados na solução Dispositivos de Dissipação de energia, em ordem crescente de ano de publicação.

Tabela 5 - Resultados categorizados na solução Dispositivos de Dissipação de Energia

| Nº | Título Original | Ano de Publicação | Autor(es) |
|----|---|-------------------|--|
| 2 | Optimum earthquake-tuned TMDs: Seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses | 2017 | Salvi, J., Rizzi, E. |
| 3 | Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels | 2017 | Hashemi, B.H., Moaddab, E. |
| 4 | Seismic performance evaluation of a structure retrofitted using steel slit dampers with shape memory alloy bars | 2017 | Naeem, A., Eldin, M.N., Kim, J., Kim, J. |
| 5 | Improving seismic performance of segmental precast post-tensioned bridge piers | 2017 | Amini, M., Mirtaheri, M., Zandi, A.P. |
| 6 | Applicability of superelastic materials in seismic protection systems: A parametric study of performance in isolation of structures | 2017 | Soul, H., Yawny, A. |
| 18 | Optimum Tuned Mass Dampers under seismic Soil-Structure Interaction | 2018 | Salvi, J., Pioldi, F., Rizzi, E. |
| 19 | A variably baffled tuned liquid damper to reduce seismic response of a five-storey building | 2018 | Enayati, H., Zahrai, S.M. |
| 27 | Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Analytical study validated by shaking table testing | 2019 | Misini, M., Ristić, J., Ristić, D., Guri, Z., Pllana, N. |
| 33 | Optimum energy based seismic design of friction dampers in RC structures | 2020 | Nabid, N., Hajirasouliha, I., Escolano Margarit, D., Petkovski, M. |
| 43 | Seismic retrofit of 3000 kVA power transformer using friction dampers and prestressed tendons | 2021 | Naeem, A., Kim, J. |
| 44 | Upgrading seismically isolated bridges with space-flange energy-dissipation devices | 2021 | Misini, M., Ristic, J., Guri, Z., Ristic, D., Pllana, N. |

Fonte: Scopus (2021)

Uma estratégia atual, amplamente preferida para melhorar o desempenho sísmico de sistemas de base fixa, envolve a dissipação de energia sísmica através de vários dispositivos de dissipação de energia (GIONCU; MAZZOLANI, 2011). Esses dispositivos são adicionados às

estruturas convencionais e absorvem a energia sísmica, reduzindo assim a demanda nos membros estruturais primários (pórticos, vigas, lajes, colunas, etc).

4.3.2.1 Amortecedores com materiais metálicos de memória de forma.

Materiais com memória de forma (MF), também conhecidos como *Shape Memory Alloy* (SMA), são materiais metálicos cujas propriedades são amplamente estudadas para aplicações em engenharia sísmica. Estes materiais, quando sujeitos a deformações, podem recuperar seu formato original por meio de variação de temperatura ou por dissipação de energia (efeito superelástico). Sua aplicação em sistemas de proteção sísmica se configura principalmente devido à sua resistência à fadiga, excelente comportamento de dissipação de energia e resistência à imposição de deformações consideráveis (GUERREIRO, 2007).

Naaem, Eldin e Kim (2018) investigaram a capacidade sísmica de um amortecedor híbrido, formado por um amortecedor de chapa de aço e duas barras de liga com memória, através da análise de fragilidade e avaliação do custo do ciclo de vida de uma estrutura de aço adaptada com o amortecedor. O aprimoramento no desempenho sísmico de quadros adaptados com amortecedor híbrido é devido à rigidez extra, dissipação de energia e capacidade de autocentralização fornecida pelas barras de liga com memória de forma. Observa-se também que o custo do ciclo de vida dos quadros equipados com amortecedores híbridos é menor em comparação com o custo do ciclo de vida dos quadros nus e dos quadros equipados com amortecedores de fenda (NAAEM; ELDIN; KIM, 2018).

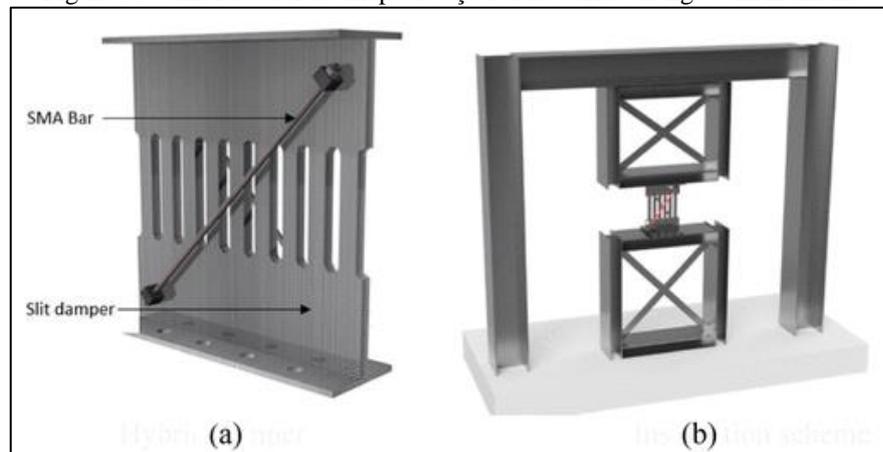
Os pesquisadores estão tentando investigar a aplicação simultânea de vários dispositivos de amortecimento para maximizar o mecanismo de dissipação de energia com maior eficiência.

Na engenharia sísmica, a análise do custo do ciclo de vida (LCC) é considerada uma das ferramentas eficazes para a análise quantitativa de risco que considera explicitamente as consequências dos eventos sísmicos em termos de perdas induzidas por sísmica. A revisão da literatura revela que estudos limitados foram realizados sobre o LCC de estruturas de edifícios retroajustados com dispositivos de dissipação de energia feitos de SMA.

Amortecedores de fenda de aço (AFA) têm sido aplicados a estruturas como dispositivos de *retrofit* sísmicos eficazes e econômicos (KIM E SHIN, 2017; SAFFARI et al., 2013). Neste estudo, o amortecedor híbrido (AH) foi desenvolvido usando um AFA de aço convencional incorporado com barras MF foi investigado usando análise de fragilidade e LCC.

O AH dissipa a energia sísmica de forma eficiente pelo escoamento de tiras de aço, e a força de autocentragem é fornecida pela propriedade superelástica das barras MF instaladas diagonalmente em ambas as faces do aço AFA. As barras MF são conectadas à placa de fenda de aço em ambas as extremidades usando ancoragem e parafusos. Supõe-se na modelagem de análise que as barras MF não resistem à compressão. As barras são instaladas diagonalmente em forma de X para que pelo menos uma barra seja submetida a tensão durante o movimento cíclico, enquanto a outra barra sofre compressão que pode deslizar através da ancoragem. O AH com barras MF é mostrado na Figura 35 (a), e Figura 35 (b) mostra o esquema de instalação do AH.

Figura 35 - amortecedor de chapa de aço e duas barras de liga com memória



Fonte: Naaem, Eldin e Kim (2018)

4.3.2.2 Dispositivos de Dissipação de Energia Inovadores

Amini, Mirtaheri e Zandi (2017) desenvolveram um método inovador para aumentar a capacidade de dissipação de energia de pilares de pontes pré-moldados pós-tensionados. Um espécime de meia escala incorporando um Dispositivo Externo de Dissipação de Energia (DEDD) inovador desenvolvido pelos autores foi construído e testado sob cargas sísmicas laterais simuladas no Laboratório de Estruturas e Terremotos da Universidade de Tecnologia KN Toosi (KNTU), Teerã, Irã.

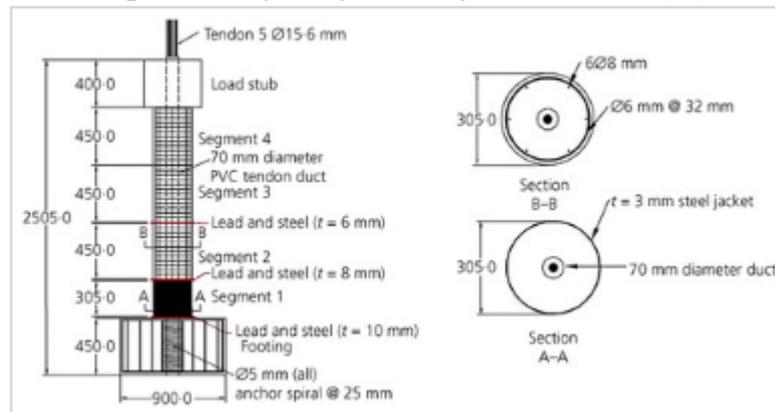
O comportamento de um pilar segmentar pré-moldado pós-tensionado sob carregamento sísmico lateral difere daquele de um pilar convencional de concreto armado. Esse comportamento é semelhante a uma fundação oscilante, onde a fundação se eleva do solo quando o momento resistente proporcionado pela gravidade é superado (KIM et al., 2010). Em um pilar segmentado de concreto pré-moldado, a maioria das grandes deformações estruturais

não são devidas à deformação plástica dentro de uma região de dobradiça, mas são causadas pela rotação rígida de todo o sistema em torno de sua base (HEWES; PRIESTLEY, 2002). Devido ao pré-esforço axial introduzido, a característica de rescentralização do sistema pré-moldado é indicada por laços de histerese comprimidos perto da origem (SHIM et al., 2008).

Por causa do mecanismo de balanço e capacidade de rescentralização, a dissipação de energia de uma coluna pré-moldada segmentada pós-tensionada (SPPT) é muito pequena em comparação com a de uma coluna convencional de concreto armado. Para melhorar a capacidade de dissipação de energia dos pilares SPPT, o uso de dispositivos de dissipação de energia interna e/ou externa de rendimento simples tem sido investigado por vários pesquisadores. Um sistema típico de dissipação de energia interna é o uso de barras de aço macio, que são ilimitadas por um determinado comprimento para evitar o escoamento prematuro das barras sob pequenas cargas sísmicas. Essas barras de aço são rápidas de instalar e econômicas, mas difíceis de reparar após a ocorrência de um evento sísmico (MARSH; STANTON, 2011). O uso de barras de liga com memória de forma como dispositivos internos de dissipação de energia para pilares de pontes de concreto segmentado com várias razões de aspecto foi investigado por MOON et al. (2015).

O novo sistema de dissipação de energia externa consiste em dois círculos concêntricos de placa de chumbo em torno de uma placa de aço. O sistema, com diversas espessuras, foi utilizado em três juntas de interface entre segmentos de concreto. A placa de aço central foi projetada como um elemento resistente contra cargas verticais de gravidade, enquanto a placa de chumbo atua como um DEDD durante os desvios laterais aplicados. Placas de chumbo foram usadas devido às suas propriedades de amortecimento adequadas e comportamento histerético, que por sua vez contribuem para a dissipação de energia das colunas SPPT. Alta capacidade de amortecimento, alta ductilidade, rápida substituição e alta resistência à corrosão foram algumas das características que levaram à decisão de utilizar placas de chumbo como o novo DEDD neste estudo. Para obter os resultados necessários, mais de 30 carregamentos cíclicos foram aplicados ao corpo de prova (Figura 36). Os resultados dos testes mostraram que a coluna equipada com o novo EEDD apresentou um aumento significativo na capacidade de dissipação de energia (até 30% em altas derivas) (AMINI; MIRTAHERI; ZANDI, 2017).

Figura 36 - corpos de prova com placas de chumbo (CL)



Fonte: Amini, Mirtaheri e Zandi (2017)

4.3.3 Materiais Alternativos

A Tabela 6 apresenta os principais resultados categorizados na solução materiais alternativos, em ordem crescente de ano de publicação.

Tabela 6 - Resultados categorizados na solução Materiais Alternativos

| Nº | Título Original | Ano de Publicação | Autor(es) |
|----|---|-------------------|--|
| 7 | Evaluation of strain-hardening cementitious composites for RC seismic strengthening | 2017 | Zhang, Y., Peng, H., Lv, W. |
| 8 | Effectiveness of externally bonded FRP systems in strengthening of RC structures in seismic areas | 2017 | Kaptan, K. |
| 22 | Glass fiber-reinforced polymer-reinforced rectangular concrete columns under simulated seismic loads | 2018 | Deng, Z., Gao, L., Wang, X. |
| 30 | Seismic bracing performance of plasterboard timber walls | 2019 | Liu, A., Carradine, D. |
| 37 | Polyethylene terephthalate fibre-reinforced polymer-confined concrete encased high-strength steel tube hybrid square columns: Axial compression tests | 2020 | Zhao, H.-C., Ye, Y.-Y., Zeng, J.-J., Zhou, J.-K., Ouyang, Y. |
| 38 | Application of carbon-fibre-reinforced polymer to low-strength concrete bridge piers | 2020 | Saeed H.Z., Khan Q.U.Z., Iqbal M., Ahmed A. |

Fonte: Scopus (2021)

4.3.3.1 Aplicação de Polímeros para reforço em elementos estruturais

Uma maior ductilidade e capacidade de dissipação de energia de colunas de concreto armado podem ser alcançadas por confinamento externo com materiais compostos avançados, como FRP (*Fibre-reinforced polymers*) – também conhecido como polímeros reforçados com

fibra de carbono (Balsamo et al., 2005). Também foi constatado que o aumento da ductilidade é mais proeminente do que a melhora na força. Envolver as colunas de concreto armado externamente com múltiplas camadas de material FRP também aumenta a rigidez e a eficiência do sistema de confinamento (HADI, 2003; HADI, 2006).

Geralmente, os códigos de projeto são revisados após qualquer grande evento natural catastrófico e as estruturas existentes são atualizadas para atender às novas demandas de ductilidade impostas pelas especificações revisadas. Da mesma forma, após o terremoto de Caxemira em 2005, o mapa de zoneamento sísmico do Paquistão foi revisado (Figura 1) e um novo código de construção, conhecido como BCP-2007, foi desenvolvido. A maioria das cidades no Paquistão foram colocadas em uma categoria mais alta das zonas propensas a sísmica. A maioria das estruturas rodoviárias existentes, particularmente as pontes RC, que foram construídas antes desse terremoto desastroso, foram projetadas de acordo com o Código de Prática do Governo do Paquistão Ocidental: Pontes Rodoviárias 1967 (GWP, 1967). A modernização das zonas sísmicas e as modificações resultantes na especificação do código de projeto sísmico tornaram a maioria das estruturas existentes mais vulneráveis a futuros danos sísmicos. Para um país em desenvolvimento como o Paquistão, é altamente antieconômico demolir estruturas deficientes existentes e reconstruir novas como substitutos. Empregar técnicas de reforço/*retrofit* é uma solução viável para restaurar ou aumentar a resistência, ductilidade e capacidade de carga de estruturas deterioradas existentes (TARANU et al., 2009).

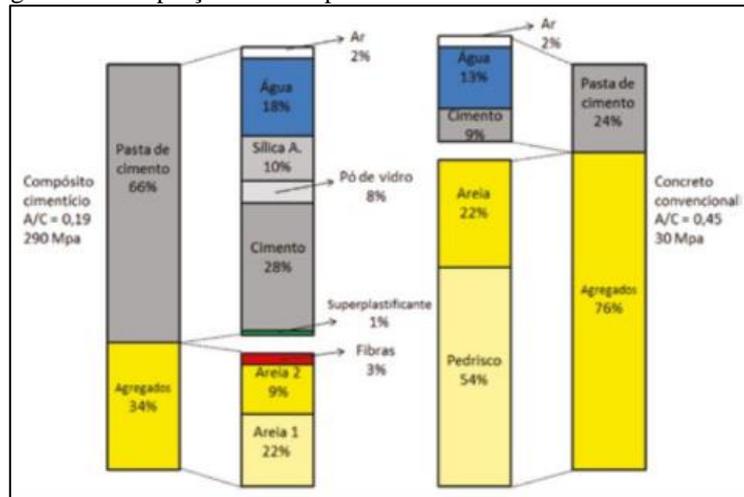
Saeed, Khan e Muhammad (2020) investigaram o uso desses materiais em colunas de concreto armado de baixa resistência (concreto com valores de resistência inferiores a 20 Mpa) utilizados em pontes. Foram apresentados resultados experimentais e numéricos para pilares de pontes de baixa resistência com e sem confinamento de PRFC sob cargas axiais e laterais. Os resultados desta pesquisa mostraram que o reforço de pilares de pontes existentes, mas deficientes, usando revestimento externo com material CFRP é uma solução viável, aumentando suas propriedades de histerese e ductilidade e oferecendo a vantagem adicional de facilidade de instalação sem qualquer interferência no desempenho da superestrutura. Os resultados experimentais foram verificados por modelagem usando colunas LSC de características semelhantes. Os resultados mostraram não apenas uma restauração, mas uma melhoria da capacidade de carga lateral devido ao efeito de confinamento externo do envolvimento de CFRP. Também foi observada uma tendência decrescente de degradação da rigidez em níveis de deriva mais altos, mostrando a proeminência da ação confinante de

envoltórios de CFRP nas extremidades inferiores dos pilares – a zona de articulação plástica esperada para pilares de pontes deficientes existentes.

4.3.3.2 Compósitos cimentícios

O compósito cimentício é um material formado pela mistura entre cimento, agregados miúdos, água, aditivos e adições. Ele se difere do concreto comum principalmente devido às proporções que compõe sua mistura, adição de fibras de vidro e a ausência de agregados graúdos, como representado na Figura 37. Esse material apresenta propriedades mecânicas elevadas, podendo alcançar valores de resistência a compressão superiores a 200 Mpa e resistência a tração superiores a 45 Mpa (IBRACON, 2015).

Figura 37 – Proporções de compósito cimentício e concreto convencional



Fonte: Naaman e Wille (2012)

O *Strain Hardening Cementitious Composite* (SHCC) é um material inovador, pertencente a uma classe especial de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibra de Alto Desempenho (HPFRCC) que, devido à composição especial do material e à adição de fibras, apresenta um comportamento controlado de microfissuração sob tensões de tração (LUKOVIC; HORDIJK; HUANG, 2019). Constituído por agregados miúdos, cimento e fibras, o compósito apresenta elevada ductilidade associada com a capacidade de gerar microfissuras quando submetido a carregamentos, num comportamento conhecido como *strain-hardening* (RODRIGUEZ, ANDRÉS, 2018). Como tal, pode ser um material promissor para melhoria da durabilidade de estruturas de concreto (LUKOVIC; HORDIJK; HUANG, 2019).

Os compósitos cimentícios de endurecimento por deformação (SHCCs) são materiais de construção atraentes para o reforço sísmico de estruturas de concreto armado (RC) danificadas. Várias investigações experimentais sobre o comportamento sísmico de SHCCs para reforço de concreto armado foram realizadas (KUNIEDA et al., 2012; YUAN et al., 2013). Esses estudos demonstraram uma resistência sísmica muito melhor em comparação com concreto comum e concreto reforçado com fibras, devido às vantagens óbvias de excelentes propriedades do material, como maior consumo de energia em tração, expresso por uma grande capacidade de deformação de tração com comportamento pseudo-endurecimento (FISCHER; LI, 2007; FUKUYAMA; SUWADA, 2003; KESNER et al., 2003) e capacidade de autocura (YANG et al., 2009), bem como permeabilidade e expansão térmica (KUNIEDA; ROKUGO, 2006; TOSHIYUKI et al., 2013).

4.3.4 Peças e Conexões Estruturais

A Tabela 7 apresenta os principais resultados categorizados na solução peças e conexões estruturais, em ordem crescente de ano de publicação.

Tabela 7 - Resultados categorizados na solução Peças & Conexões estruturais

| Nº | Título Original | Ano de Publicação | Autor(es) |
|----|---|-------------------|--|
| 9 | Seismic testing of high-strength steel eccentrically braced frames with a vertical | 2017 | Duan, L., Su, M. |
| 10 | Shear strength model of reinforced-concrete exterior joint under cyclic loading | 2017 | Tran, T.M., Hadi, M.N.S. |
| 11 | Seismic performance and force transfer of wide beam-column joints in concrete buildings | 2017 | Luk, S.H., Kuang, J.S. |
| 12 | Seismic performance of deficient masonry infill reinforced-concrete structures | 2017 | Ali, M.U., Khan, S.A., Anwar, M.Y., Aleem, A., Raza, S., Maqbool, U. |
| 13 | Damage-control evaluation of high-strength steel frames with energy dissipation bays | 2017 | Ke, K., Chen, Y., Jia, L.-J. |
| 14 | Optimum engineered infilled frames and the influence of openings | 2017 | Mohammadi, M. |
| 15 | High-strength steel for resilience of beam-through frames | 2017 | Chen, Y., Wang, W., Chen, Y. |
| 16 | Seismic retrofit of slab-on-girder steel bridges | 2017 | Jamshidi, M., Majid, T.A. |
| 23 | Structural performance of steel-truss reinforced composite joints under cyclic loading | 2018 | Deng, Z., Hu, Q., Zeng, J., Xiang, P., Xu, C. |

| | | | |
|----|---|------|---|
| 24 | Experimental Study on Existing Reinforced Concrete Frames Strengthened by L-type Precast Concrete Wall Panels to Earthquake-Proof Buildings | 2018 | Ha, S.K., Yu, S.Y., Kim, J.S. |
| 25 | Interaction of masonry walls and shear walls in masonry buildings | 2018 | Sartaji, P., Moghadam, A.S., Ghafory Ashtiany, M. |
| 26 | Optimal seismic retrofit model for steel moment resisting frames with brittle connections | 2018 | Park, H.S., Choi, S.W., Oh, B.K. |
| 31 | Mechanical modeling of superelastic tensegrity braces for earthquake-proof structures | 2019 | Fraternali, F., Santos, F. |
| 39 | Cyclic loading tests of earthquake-resilient prefabricated cross joint with single flange cover plate | 2020 | Jiang, Z.-Q., Lan, T., Dou, C., Wu, Y.-X., Zhang, H. |
| 40 | Design theory of earthquake-resilient prefabricated beam-column steel joint with double flange cover plates | 2020 | Jiang, Z.-Q., Yang, X.-F., Dou, C., Pi, Y.-L., Li, R. |
| 41 | Earthquake-proof system for masonry infills in RC frame structures | 2020 | Marinković, M., Butenweg, C. |
| 45 | Load transfer by a studded steel coupling beam to a reinforced concrete shear wall | 2021 | Nahvinia, M.A., Tasnimi, A.A. |
| 46 | Post-earthquake fire behaviour of steel-to-concrete joints using post-installed anchorages | 2021 | Xie, Q., Xue, S., Xu, L. |
| 47 | Behaviour of the joint between slabs and walls composed of light steel and foam concrete | 2021 | Liu, D., Liu, H., Zhang, F. |
| 48 | New Insights on the Borbone Construction System: a Peculiar 18th Century Retrofitting Solution for Earthquake Damaged Churches | 2021 | Ruggieri, N. |

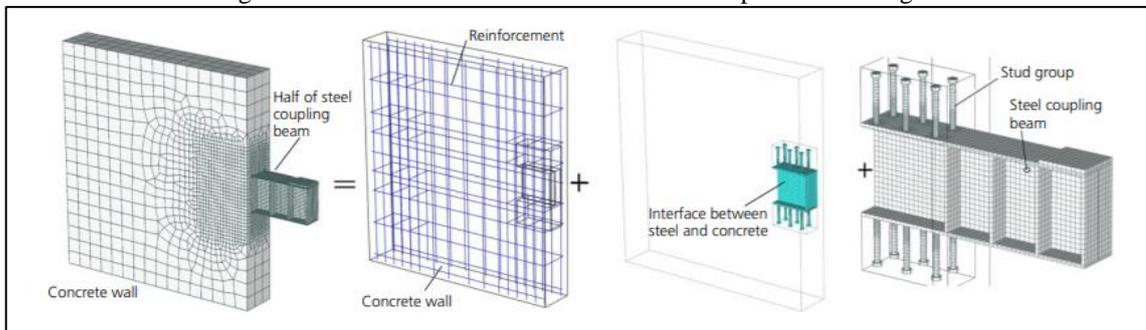
Fonte: Scopus (2021)

4.3.4.1 Estudo de transferência de carga de conexão vigas de aço com paredes de concreto armado

Vários códigos internacionais e normas já prescreveram detalhamentos para acoplamento de vigas de concreto armado em paredes de concreto armado para comportamento antissísmico (ACI, 2014), como mostrado na Figura 38. Essa solução requer um detalhamento mais criterioso, como ancoragem especial de reforço nos pilares das paredes de concreto, estribos com espaçamento pequenos ao redor das barras principais para prevenir empenamento e limitações arquitetônicas para uma vez que exigem execução de grandes alturas para execução dos acoplamentos. Atualmente, uma alternativa para esse sistema é a utilização de vigas de aço acopladas às paredes de concreto armado para comportamento sísmico e manutenção da estabilidade de edifícios médios e altos. As principais vantagens desse sistema consistem em oferecer grande rigidez lateral; grande resistência lateral; absorção adequada a esforços laterais; formação de dobradiças inelásticas nos acoplamentos das vigas ao longo da altura da estrutura

para alívio da concentração de esforços nas fundações; e maior dissipação da energia (NAHVINIA; TASNIMI, 2019).

Figura 38 - Paredes de concreto armado com acoplamento de vigas



Fonte: Nahvinia e Tasnimi (2019)

Além disso, Nahvinia e Tasnimi (2019) realizaram um estudo do comportamento de transferência de carga desse sistema a partir de dois modelos: o primeiro com uso de pregos e o segundo, uso de pinos com cabeça no acoplamento viga-parede. Com o auxílio de modelos numéricos de elementos finitos e análises experimentais, o estudo mostrou que os pinos de cabeça usados de acoplamento das vigas às paredes transmitiam maiores esforços de cisalhamento e flexão ao invés de esforços axiais (descobertas que estavam de acordo com resultados experimentais) enquanto os pregos eram mais eficientes na transferência de flexão na conexão do que o cisalhamento. Ademais, os pinos melhoraram a capacidade de transferência de esforços de flexão da conexão mais do que a capacidade de cisalhamento (NAHVINIA; TASNIMI, 2019).

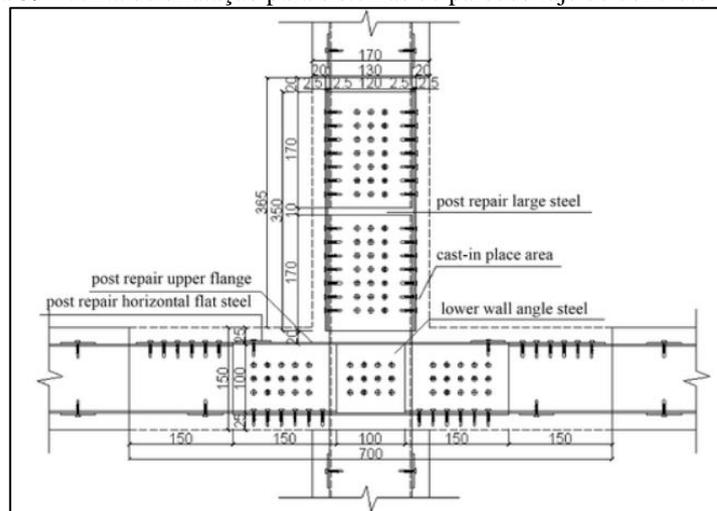
4.3.4.2 Novo tipo de junta entre lajes de paredes compostas por aço leve e concreto esponjoso

A construção pré-fabricada é uma das áreas que mais potencializa a industrialização da construção ao oferecer vantagens como maior rapidez de montagem dos elementos estruturais, maior rastreabilidade do processo, redução de geração de entulhos e desperdícios em obra, redução de prazos de construção, propício para economia de energia e proteção ambiental (PREMODISA, 2017; LIU; ZHANG; 2021). Entretanto, a conexão entre os componentes pré-fabricados é muitas vezes fácil de se tornar uma área vulnerável do edifício pré-fabricado, o que afeta diretamente a segurança geral da estrutura. Portanto, a junta de

conexão entre componentes pré-fabricados é a principal prioridade de pesquisa em edifícios pré-fabricados e principalmente quando estão submetidos a carregamentos de alta intensidade como tremores sísmicos causados por terremotos. Liu, Liu e Zhang (2021) propuseram um nova junta de dilatação para o sistema de paredes-laje de concreto armado com uso de concreto esponjoso (peso específico de 1600 kg/m^3). Esse sistema foi modelado numericamente no software de análise de elementos finitos ABAQUS e seus dados de teste avaliaram a capacidade do sistema sob condições de curva carga-deslocamento, resistência, rigidez, ductilidade e dissipação de energia (LIU; ZHANG; 2021).

A estrutura da nova junta é formada por lajes e paredes integralmente pré-fabricadas, e são feitas de concreto leve e aço de paredes finas, por isso tem um peso leve, o que facilita o processo de transporte e montagem. Os painéis da parede são conectados com a seção de aço exposta na extremidade da laje de piso e o concreto é derramado no local. A área da junta é composta de aço da seção da parede superior, aço grande pós-reparo, aço da seção da parede inferior, aço angular da parede inferior, aço da seção da laje esquerda, aço da seção da laje direita, flange superior pós-reparo e aço plano horizontal pós-reparo (Figura 39) (LIU; ZHANG; 2021).

Figura 39 - Junta de dilatação para sistemas de paredes-laje de concreto armado

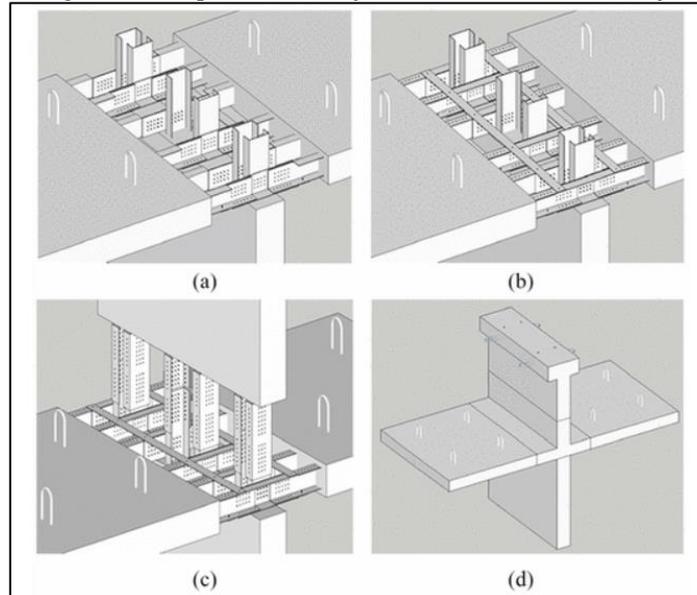


Fonte: Liu e Zhang (2021)

As etapas de construção ocorrem em 4 procedimentos principais (Figura 40): primeiramente (a), uma vez que a parede de concreto está posicionada, as lajes de aço que serão colocadas em sobreposição são içadas no local de conexão da junta com os elementos estruturais horizontais e verticais. Em seguida (b) a região de aço exposta da parede e lajes serão travadas com as seções de aço da junta com a lapidação dos flanges superiores de aço no

sentido longitudinal e transversal da junta e com uso de pregos auto roscáveis. Na etapa (c), a parede superior do sistema é colocada e travada à junta. Por fim, em (d), a região de conexão dos elementos é finalizada com o lançamento de concreto autoadensável (LIU; ZHANG; 2021).

Figura 40 - etapas de construção do sistema de Paredes-laje



Fonte: Liu e Zhang (2021)

Liu, Liu e Zhang (2021) fizeram duas amostras e avaliação do sistema com carregamentos cíclicos e de intensidades distintas. Cargas axiais foram aplicadas de forma cíclica e crescente na ordem de 150 kN, 330 kN, 500 kN e 660 kN. Um atuador de 2000 kN foi utilizado para aplicar pressão axial de 66 kN nas paredes e taxa de compressão de 0,113 enquanto um atuador de 1000 kN foi utilizado par aplicação de cargas alternativas nas extremidades das lajes (LIU; ZHANG; 2021).

O novo método evita o trabalho de ajustar orifícios dos componentes pré-fabricados, não requer alinhamento preciso durante a construção, a degradação da junta em níveis de carregamento testados foi pequena, a repetição de carga teve pouca influência do desempenho das amostras, e as juntas apresentaram grandes deslocamentos, boa ductilidade e grandes deformações antes do rompimento (LIU; ZHANG; 2021).

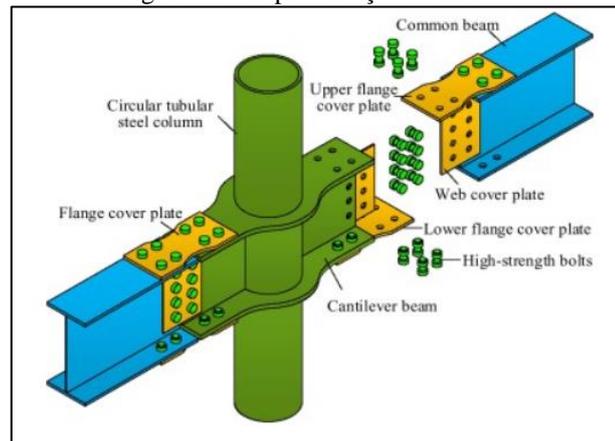
4.3.4.3 Testes de carregamento cíclico de junta cruzada pré-fabricada resiliente a terremotos com placa de cobertura de flange única

Com base no conceito de controle de danos, um novo tipo de junta cruzada pré-fabricada resiliente a terremotos (ERPCJ) com placa de cobertura de flange simples (FCP) foi proposto. O ERPCJ é composto por uma coluna tubular circular de aço com uma viga *cantilever*, uma viga comum e um dispositivo de conexão. A dobradiça de plástico será transferida para o dispositivo de conexão, quando a viga *cantilever* foi reforçada e os FCPs foram reduzidos. Este projeto requer apenas a substituição do dispositivo de conexão para obter a recuperação após um terremoto (JIANG; LAN; DOU; WU; ZHANG, 2020).

Os experimentos mostraram que o ERPCJ com ajustes de parâmetros razoáveis possuía boa capacidade de carga e características de histerese. O programa de reparo de substituição do dispositivo de conexão foi viável e os requisitos de resiliência a terremotos puderam ser atendidos. O ERPCJ utiliza a deformação plástica dos FCPs para dissipar a energia sísmica e melhorar sua ductilidade e capacidade de rotação. Além disso, a espessura e as propriedades do material dos FCPs e uma lacuna entre os feixes afetam significativamente o desempenho sísmico da junta (JIANG; LAN; DOU; WU; ZHANG, 2020).

Zhang e Jiang (2019) propuseram um novo tipo de junta cruzada pré-fabricada resiliente a terremotos (ERPCJ) com placa de cobertura de flange única (FCP). O ERPCJ é composto por três partes: a coluna de aço com viga *cantilever*, viga comum e os dispositivos de conexão compostos pelos FCPs, placas de cobertura da alma e parafusos de alta resistência (Figura 41) Todos os componentes acima foram processados na fábrica. O canteiro de obras adota parafusos de alta resistência para montagem rápida. A junta é uma conexão semirrígida, o dano estrutural pode ser transferido para os componentes de conexão substituíveis por um projeto estrutural adequado e pode ser reparado rapidamente após um terremoto. Neste estudo, sete testes de carregamento cíclico de baixa frequência foram realizados em seis espécimes e espécimes reparados (JIANG; LAN; DOU; WU; ZHANG, 2020).

Figura 41 - Representação da ERPCJ



Fonte: Jiang, Lan, Dou, Wu e Zhang (2020)

Por meio da pesquisa, as seguintes conclusões puderam ser tiradas: Um ERPCJ bem projetado pode transferir a dobradiça de plástico para os FCPs para que a junta tenha boa capacidade de carga e desempenho de dissipação de energia. As vigas e colunas basicamente não sofreram danos após o experimento e o espécime pôde ser reparado rapidamente com a substituição do dispositivo de conexão. A flambagem plástica dos FCPs pode dissipar efetivamente a energia sísmica e aumentar a ductilidade e a capacidade de rotação da junta. Reduzindo a espessura dos FCPs, a carga de escoamento teórico diminuiria, e a junta nem mesmo atenderia aos requisitos de capacidade de carga no estágio posterior (JIANG; LAN; DOU; WU; ZHANG, 2020).

4.3.5 Construções históricas

A Tabela 8 apresenta os principais resultados categorizados na solução envolvendo construções históricas, em ordem crescente de ano de publicação.

Tabela 8 - Resultados categorizados na solução Construções históricas

| Nº | Título Original | Ano de Publicação | Autor(es) |
|----|---|-------------------|---------------------------------------|
| 1 | Solving the mystery of China's thousand-year-old wooden pagoda | 2017 | Zhong, J., Wang, L., Li, Y., Zhou, M. |
| 17 | Comparison between Two Traditional Earthquake-Proof Solutions: Borbone and Lefkada Timber-Frame Systems | 2018 | Tonna, S., Ruggieri, N., Chesi, C. |

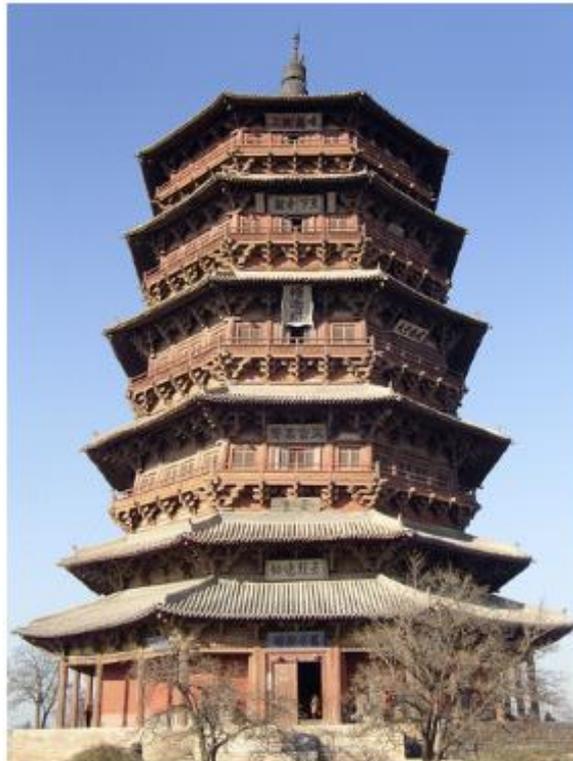
Fonte: Scopus (2021)

4.3.5.1 Solucionando o mistério do Pagoda chinês de mais de mil anos

Pagoda é um tipo de arquitetura espiritual, monumental e de alta tecnologia do período final da dinastia Han Oriental (25-220 AC) até a dinastia Qing (1644-1911) na China. Em termos de arquitetura, representado pelo Pagoda de Madeira Yingxian (1056), o pagoda é essencialmente uma torre de andares, e cada andar é um edifício separado composto por todos os componentes estruturais.

O Pagoda de Madeira Yingxian foi construído no condado de Yingxian, província de Shanxi, China em 1056 CE (ZHAO, 1992) (Figura 42). Com quase 1000 anos, é a torre de madeira mais antiga do mundo, ao lado da Torre Inclinada de Pisa na Itália e da Torre Eiffel na França por interesse histórico e de engenharia (DUAN, 2007). Nos últimos dez séculos, o edifício de 67,3 m de altura – que não tem pregos de qualquer tipo – sofreu muitos grandes terremotos, tempestades e guerras, mas ainda está de pé hoje, sem risco imediato de colapso (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

Figura 42 - Pagoda de madeira Yingxian



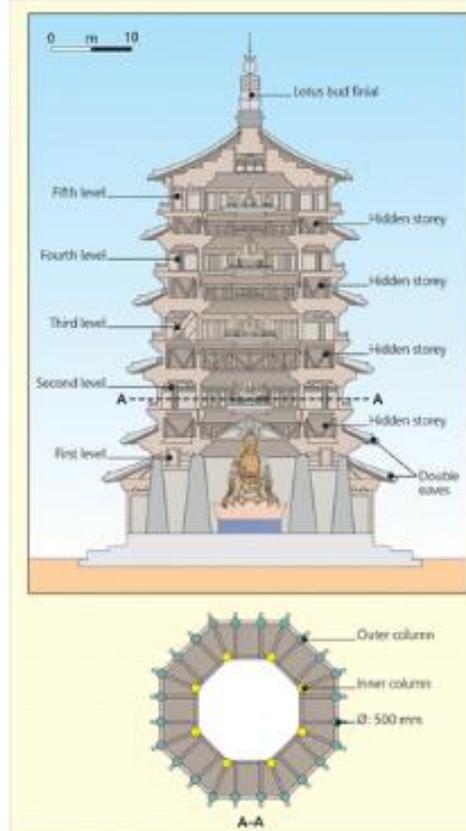
Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

A seção transversal do pagoda é octogonal, emprestando dos oito diagramas da antiga filosofia chinesa (Figura 43). É sustentado por 32 colunas de 500 mm de diâmetro, sendo 24

colunas externas e oito colunas internas (LI, 2010). O peso da estrutura é de aproximadamente 3.000 t e contém 5.500 m³ de madeira. Cada coluna de madeira carrega uma carga média de 100 t ao nível do solo. No entanto, ao contrário das colunas estruturais modernas, as colunas do pagoda simplesmente repousam sobre a base de pedra lisa. O uso extensivo de suportes flexíveis, multicamadas e de suporte de carga é outra característica notável da estrutura. Chamados de *dougongs*, eles geralmente são usados como espalhadores de carga entre o topo de uma coluna e as vigas do piso ou do telhado acima (ZHOU et al., 2014).

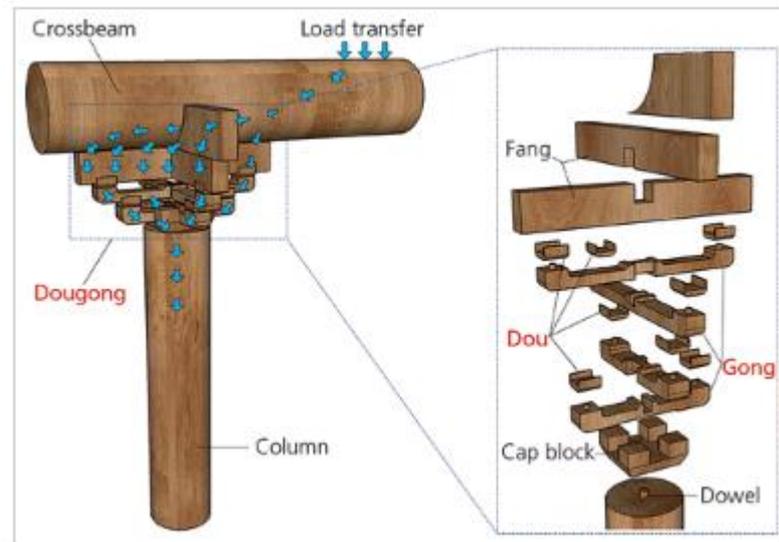
Um *dougong* é formado colocando um grande bloco de madeira (*dou*) no topo de uma coluna para fornecer uma base segura para um par de suportes (*gongos*) interligados acima dela. Estes, então, suportam camadas subsequentes de *dou* e *gong* e, finalmente, uma viga cruzada sem cola ou fixadores. Ao espalhar a carga sobre uma área maior, a concentração de tensão na junta viga-pilar é diminuída (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

Figura 43 - Seção transversal do Pagoda de Yingxian



Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

Figura 44 - Dougong



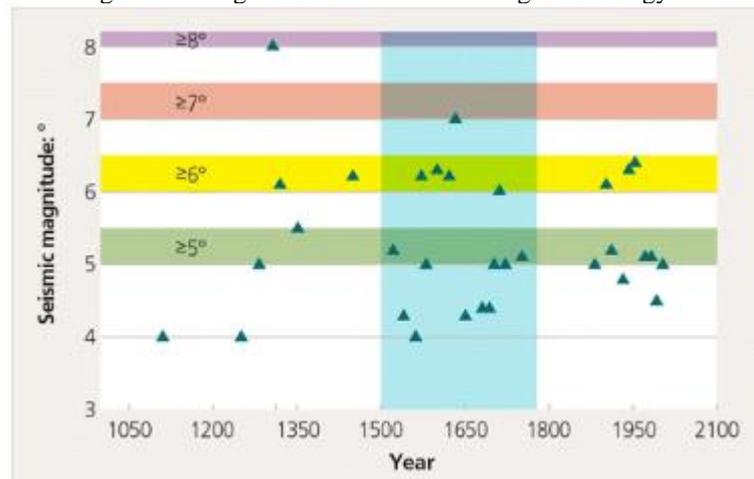
Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

Ao longo de sua longa vida, o pagoda foi exposto a muitos eventos extremos, principalmente terremotos. Yingxian está na zona sísmica do norte da província de Shanxi, onde existem várias fontes sísmicas potenciais.

Mais de 30 terremotos de magnitude 4 e acima ocorreram na zona desde que o pagoda foi construído (WEI; LI, 2004) (Figura 45). Estes incluem dois terremotos graves com magnitude superior a 7, que danificaram significativamente o pagoda – algumas deformações residuais permanecem até hoje.

Há também muitas tempestades em Yingxian a cada ano, com numerosos registros históricos de pessoas e edifícios sendo atingidos por raios (DING et al., 1990). De 1972 a 1988, as tempestades ocorreram em média 38,5 dias por ano, e isso aumentou para 41,1 dias desde 1990. Ao considerar o pagoda como um condutor ou semicondutor, o número de relâmpagos que provavelmente sofreu pode ser calculado a partir da probabilidade, frequência, área de superfície de atração e idade do edifício. Teoricamente, o pagoda poderia ter sido atingido por um raio pelo menos 197 vezes nos últimos 960 anos (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

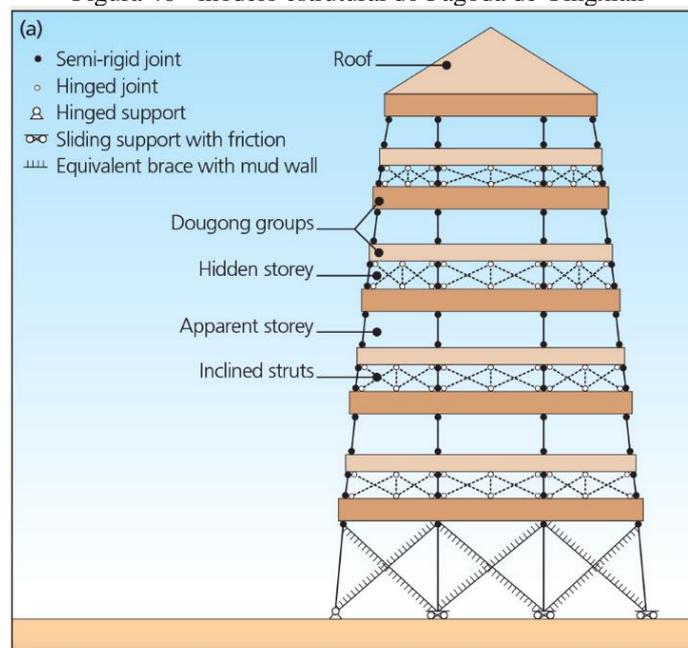
Figura 45 - Registros de terremotos na região de Xingyian



Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

Um modelo estrutural simplificado do pagoda é mostrado na Figura 46. Pode-se observar que nos pavimentos ocultos são utilizadas bielas inclinadas entre os pilares para melhorar a estabilidade (CHEN, 2011). Juntamente com os grupos de *dougong* superior e inferior, eles formam uma estrutura rígida semelhante a uma treliça - semelhante às vigas de anel em estruturas modernas. Não existe tal elemento de treliça nos andares aparentes, cuja rigidez é, portanto, muito menos (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

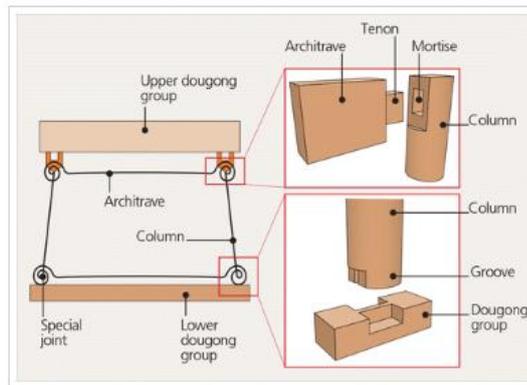
Figura 46 - modelo estrutural do Pagoda de Yingxian



Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

Uma das características mais notáveis das antigas estruturas de madeira na China é a conexão espiga e encaixe, como mostrado na Figura 47. Estes são usados entre os topos das colunas e as vigas 'arquitrave' abaixo de cada nível do piso. A conexão é uma junta semirrígida – em algum lugar entre uma junta fixa e uma dobradiça. Se os pilares permanecerem verticais e perpendiculares aos pisos, a rigidez da junta é quase nula. As colunas do pagoda são, portanto, instaladas em pequenos ângulos em relação à vertical (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

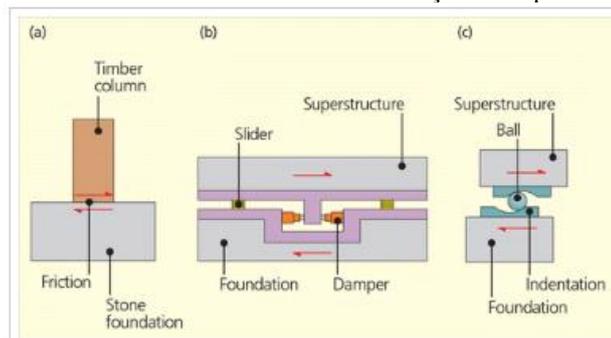
Figura 47 - conexão espiga e encaixe, Pagoda Yingxian



Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

Por não terem ligação direta entre os pilares e a fundação, os pilares assemelham-se aos pés de uma mesa. As cargas verticais são transferidas de forma confiável para a fundação; não há tensões de tração axiais; e as forças de cisalhamento são limitadas ao atrito na base da coluna (Figura 48). Se o atrito total nas bases dos pilares for superado por uma ação sísmica horizontal, um pequeno deslizamento lateral de toda a estrutura em relação ao solo dissipará a energia considerável gerada por um terremoto. A separação entre a estrutura principal e a fundação é uma característica comum dos antigos edifícios de madeira na China (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

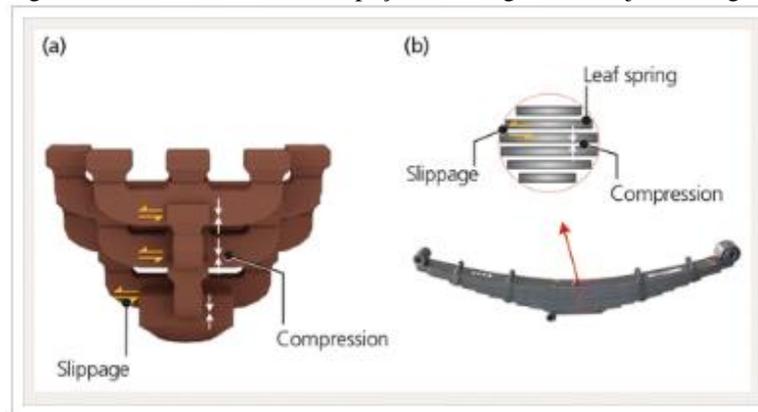
Figura 48 - Mecanismo de transferência de esforços entre pilares e fundação



Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

Outra característica que protege o pagoda de terremotos e ventos são os suportes flexíveis *dougong*. Figura 49 (a) mostra um padrão clássico de *dougong* no Pagoda de Madeira Yingxian. Estes são feitos principalmente de pinho *Huanghua* local, que tem uma alta capacidade de carga e excelente elasticidade. A deformação elástica de um *dougong* pode, portanto, absorver uma quantidade significativa de energia. A deformação por compressão pode ocorrer sob cargas sísmicas verticais, enquanto o deslizamento entre os componentes pode ocorrer durante a ação sísmica horizontal e do vento. Embora um *dougong* possa se soltar devido à compressão e deslizamento, geralmente não corre o risco de se desfazer, pois muitos deles estão trabalhando juntos. *Dougongs* funcionam efetivamente de maneira semelhante às molas de lâmina de aço do veículo (Figura 49 (b)) (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

Figura 49 - Mecanismos de dissipação de energia de uma junta dougong



Fonte: Zhong, Wang, Li e Zhou (2017)

Em 1993, uma exploração geológica em larga escala foi realizada no pagoda por estudiosos de vários departamentos de pesquisa. Os resultados indicaram que o solo é constituído principalmente por argila e areia e que a geologia de engenharia foi muito favorável à construção do Pagoda. Ademais, normalmente seria de esperar que uma estrutura de madeira tão antiga fosse amplamente danificada por carunchos, besouros que se alimentam de madeira, mas o pagoda tem duas defesas naturais. Primeiro, o óleo do pinheiro *Huanghua* é um impedimento natural para os esses insetos e, segundo, as andorinhas que habitam o prédio na primavera e no verão se alimentam desses besouros (ZHONG; WANG; LI; ZHOU, 2017).

4.3.6 Retrofit

A Tabela 9 apresenta o principal resultado categorizado na solução envolvendo *retrofit*.

Tabela 9 - Resultados categorizados na solução *Retrofit*

| Nº | Título Original | Ano de Publicação | Autor(es) |
|----|---|-------------------|---|
| 42 | Shaking table tests on strengthened adobe dwellings typical of Mexico | 2020 | Catalán-Quiroz, P., Moreno-Martínez, J.Y., Galván, A., Arroyo-Matus, R. |

Fonte: Scopus (2021)

4.3.6.1 Residências em Adobe reforçadas com arames de aço para proteção sísmica

A alvenaria de adobe é um material de construção tradicional comum nas habitações de áreas rurais de países em desenvolvimento com baixo desenvolvimento econômico e alto grau de marginalização. As paredes de adobe dessas moradias são tipicamente feitas de terra, palha e água, enquanto madeira é usada no sistema de telhado. A maioria desses materiais é adquirida localmente, tornando a construção economicamente viável (CATALÁN-QUIROZ; MORENO-MARTÍNEZ; GALVÁN; ARROYO-MATUS, 2021).

Adobe tem várias desvantagens quando comparado a materiais como alvenaria de tijolo de argila ou concreto. Por exemplo, o adobe tem baixa resistência a forças de flexão, cisalhamento e compressão axial. Além disso, o adobe se degrada fisicamente quando exposto a intempéries e, conseqüentemente, o adobe é um dos materiais de construção mais vulneráveis (CATALÁN-QUIROZ; MORENO-MARTÍNEZ; GALVÁN; ARROYO-MATUS, 2021). Apesar disso, 30-50% da população mundial vive ou trabalha na construção de terra (MACABUAG et al ., 2012 ; VARUM et al ., 2013), e aproximadamente 50% da população nos países em desenvolvimento (incluindo o a maioria da população rural e pelo menos 20% da população urbana e suburbana) vive em residências de barro (HOUBEN E GUILLAUD, 1994) A alvenaria de adobe também é interessante para resgatar o patrimônio de construções históricas e para utilizá-lo como material de construção 'ecologicamente correto' (JIMÉNEZ DELGADO; CAÑAS GUERRERO, 2006). Adobe também foi um dos materiais predominantes usados em muitas construções feitas nos séculos XIX e XX - isto é, antes da introdução dos códigos sísmicos. Portanto, a não consideração das disposições sísmicas torna

os edifícios de adobe consideravelmente vulneráveis à ação sísmica (SATHIPARAN E MEGURO, 2015; VARUM et al., 2013). Por causa disso, danos consideráveis em eventos sísmicos ocorreram em áreas onde existem edifícios de alvenaria de adobe. A Tabela 10 mostra os danos em edifícios de adobe sujeitos a eventos sísmicos em todo o mundo (BLONDET et al., 2011; DOWLING, 2004; EERI, 2004; INEI, 2007; USAID, 2001).

Tabela 10 - Danos em áreas com edifícios de alvenaria de adobe

| País | Ano | Edifícios danificados | Edifícios severamente danificados / desmoronando | Mortes | Afetado |
|-------------|------|-----------------------|--|--------|-----------|
| México | 2018 | 16 000 | 3000 | N / D | N / D |
| México | 2017 | 61 677 | 23 106 | 98 | 2 300 000 |
| Peru | 2007 | 75 000 | 75 000 | 600 | 300 000 |
| Irã | 2003 | 63 730 | 49.000 | 43 200 | 60 000 |
| El Salvador | 2001 | 157 070 | 110 000 | 1100 | 1.600.000 |
| Peru | 2001 | 51 000 | 25 000 | 81 | 220 000 |

Fonte: Blondet, Dowling, Eeri, Inei e Usaid (2011)

Figura 50 - residências de alvenaria em adobe, México



Fonte: Catalán-Quiroz, Moreno-Martínez, Galván e Arroyo-Matus (2021)

Figura 51 - Reforço de arame em moradias de adobe



Fonte: Catalán-Quiroz, Moreno-Martínez, Galván e Arroyo-Matus (2021)

Os resultados dos testes de habitações de adobe indicam que a técnica de reforço adotada melhora significativamente o comportamento do modelo, atingindo o dobro das acelerações e reduzindo os desvios da ordem de 10 vezes na aceleração máxima. Isto é conseguido através do aumento dos custos com materiais e mão de obra em cerca de 20%, melhorando assim a relação custo-eficácia e a viabilidade destas habitações. O período inicial do modelo as-built foi de 0,012 s, enquanto este foi de 0,048 s para o modelo reforçado - ou seja, o período de vibração reduzido em até 60% (CATALÁN-QUIROZ; MORENO-MARTÍNEZ; GALVÁN; ARROYO-MATUS, 2021). O coeficiente de cisalhamento base resistido pelo modelo as-built (0,41) foi inferior ao do modelo reforçado (0,7). A malha hexagonal e os rebocos de argamassa de cimento-areia são adequados para melhorar a integridade e confinar adequadamente as paredes de adobe sob forças inerciais fora do plano das paredes, o que se reflete em um nível menor de danos (Figura 51). Outra vantagem da técnica de reforço proposta é sua facilidade de implementação em construções de adobe existentes. A armadura consiste apenas em recobrir as paredes de adobe em ambas as faces com uma malha hexagonal (tela de galinheiro) e uma argamassa de cimento e areia na proporção de 1: 3. A malha hexagonal é uma solução prática para reforçar este tipo de habitações existentes sob potenciais eventos sísmicos (CATALÁN-QUIROZ; MORENO-MARTÍNEZ; GALVÁN; ARROYO-MATUS, 2021).

5 CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo apresentar as principais soluções antissísmicas que foram desenvolvidas internacionalmente e são empregadas para a prevenção contra sismos em construções, no período entre 2017 e 2021. À vista disso, foi realizada uma revisão integrativa de literatura na Scopus, base holandesa de resumos e citações da literatura mundial com revisão por pares. Os resultados encontrados implicaram em 48 artigos publicados em diferentes países, e notadamente situados em regiões sísmicamente ativas. A produção científica em relação ao tema foi registrada principalmente na Oceania, América, Ásia e Europa, sob a abordagem de distintos sistemas de proteção e em diversas tipologias estruturais, além da ocorrência de estudos de construções históricas e técnicas de *retrofit* sísmico. Por meio deste estudo, foi possível apresentar uma visão geral sobre as contribuições para o estado tecnológico atual de sistemas de proteção sísmica em edificações bem como a possibilidade de identificar os principais desafios para futuras pesquisas e soluções preventivas mais eficazes contra terremotos.

Em relação aos principais obstáculos, a evolução da engenharia sísmica pode ser analisada a partir de aspectos técnicos e econômicos. Partindo do ponto de vista técnico, a Engenharia sísmica, por se tratar de um campo da ciência multidisciplinar, depende do progresso científico desenvolvido por diferentes áreas: sismologia, geologia, engenharia estrutural, física aplicada e matemática aplicada. Assim, investimentos realizados de maneira estratégica afetam diretamente no progresso científico desta ciência. Por outro lado, tão importante quanto estudar e avaliar os fenômenos complexos envolvendo o estudo de terremotos e construções preventivas, faz-se necessário a materialização dessas soluções, que está limitada por, dentre outros fatores, o seu aspecto econômico. As limitações econômicas concebem os seguintes cenários: sistemas de proteções caros, o que torna sua viabilidade mais provável de implantação em países desenvolvidos; substituição da execução de sistemas de proteção por meio da investigação histórica ou por processos de *retrofit*; desocupação ou limitação construtiva em regiões mais sísmicamente vulneráveis. Dessa forma, a engenharia sísmica tem como objetivo a redução de perdas econômicas e vidas humanas, mas não necessariamente a completa eliminação desses riscos.

Além da criação de soluções estruturais para garantir resistência e durabilidade frente aos esforços, surge à necessidade de se pensar na fase posterior ao evento, de garantir que serviços essenciais como abastecimento de água, logística e energia continuem sendo realizados e, logo, uma atenção maior seja dada a obras e edifícios estratégicos como subestações elétricas, hospitais, edifícios públicos, pontes etc.

As principais estratégias encontradas abordam sistemas de proteção ativa, passiva e híbridos. Os principais sistemas passivos encontrados são descritos pelos isoladores de base e dispositivos de dissipação de energia, enquanto os sistemas de controle ativos foram expostos pelo emprego de tecnologias envolvendo a aplicação de peças e conexões nas estruturas. Sistemas híbridos representam uma combinação de características de controle passivo e ativos atuando juntos.

O método utilizado apresentou um resultado satisfatório para a realização deste trabalho uma vez que foi possível atingir seus objetivos específicos e, conseqüentemente, elucidar o objetivo geral. Entretanto, ressalta-se que os resultados estão estritamente ligados aos parâmetros definidos na estratégia de busca, principalmente pela escolha da base de dados, filtros aplicados, idiomas de interesse e documentos científicos do tipo artigo científico. A reprodução desta investigação sob diferentes condições pode apresentar resultados distintos.

Por fim, a partir do panorama geral apresentado neste trabalho sobre a proteção antissísmica de edifícios, recomenda-se que novas pesquisas possam ser realizadas de forma mais específica, levando em conta outros parâmetros que influenciam na elaboração de projetos antissísmicos: dinâmica dos solos, mapeamento de risco sísmico, avaliação de custo, atualização de normas técnicas, entre outros.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se:

- Investigar o avanço da engenharia sísmica para a segurança das construções em países em desenvolvimento uma vez que muitas soluções não são aplicadas em alguns países devido à falta de investimentos em ciência e tecnologia ou até mesmo pela impossibilidade econômica ou falta de incentivo à manutenção e reconstrução de edifícios em regiões sísmicamente ativas.

- Avaliar uma solução de proteção sísmica específica e explorar sua aplicação em tipologias estruturais distintas.
- Realizar um comparativo de custos entre as principais soluções antissísmicas utilizadas nos países desenvolvidos e compreender os principais critérios que influenciam na tomada de decisão pela opção de uma alternativa.
- Explorar o avanço da legislação e da atualização de normas e códigos internacionais na engenharia sísmica e quais fatores influenciam direta e indiretamente nesse processo.
- Apurar o avanço tecnológico da engenharia sísmica num período maior (10, 20 ou 30 anos) em um país desenvolvido que se situa em regiões sísmicamente ativas. Um exemplo é o caso da China que, como foi mostrado no capítulo 4, tem apresentado grande contribuição na produção científica no campo da engenharia sísmica nos últimos 5 anos e atualmente é a líder mundial em projetos de infraestrutura culturais segundo dados da AEA Consulting, empresa de consultoria cultural.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Afaq; KHAN, Qaiser; SAEED, Zain; et al. Application of CFRP on Low strength Concrete bridge piers to prevent structures Disasters. **Bridge Engineering**, 2020.

AIKEN, I.D., NIMS, D.K., WHITTAKER, A.S.; KELLY, J.M. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. **Earthquake Spectra**, 9(3), 336-370. 1993.

AIKEN, I.D., NIMS, D.K., WHITTAKER, A.S.; KELLY, J.M. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. **Earthquake Spectra**, 9(3), 336-370. 1993.

ALI, Muhammad Usman; KHAN, Shaukat Ali; ANWAR, Muhammad Yousaf; et al. Seismic performance of deficient masonry infill reinforced-concrete structures. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 2, p. 143–155, 2017.

AMINI, Mehrshad; MIRTAHERI, Masoud; ZANDI, Amir. Improving seismic performance of segmental precast post-tensioned bridge piers. **ICE Proceedings Structures and Buildings**, 2017.

ARROYO, Lorena; MANETTO, Francesco. Um forte terremoto de magnitude 7,2 atinge o Haiti. **El País**. 2021. Disponível em: <<https://brasil.elpais.com/internacional/2021-08-14/um-forte-terremoto-de-magnitude-72-atinge-o-haiti.html>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421: Projetos de Estruturas Resistente à Sismos**. Rio de Janeiro, p. 26. 2006.

BOLT, Bruce A. Terremotos. Volume 6 de Serie Reverté Ciencias y Sociedad Series. **Editora Reverté**. 1981. 270 p.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**. Belo Horizonte, Vol. 5, N. 11, P. 121-136 Maio/Ago., 2011.

BUCKLE, I. G. Application of Passive Control Systems to the Seismic Retrofit of Historical Buildings in the United States of America. Construction for Earthquake Hazard Mitigation: Seismic Isolation Retrofit of Structures, **Proceedings of the 1995 Annual Seminar of the ASCE Metropolitan Section**, American Society of Civil Engineers, New York, February 6-7. 1995.

CALABRESE, A.; LOSANNO, Daniele; BARJANI, A.; et al. Effects of the long-term aging of glass-fiber reinforced bearings (FRBs) on the seismic response of a base-isolated residential building. **Engineering Structures**, v. 221, p. 110735, 2020.

CARLSON, J.D.; SPENCER, JR., B.F. Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control, **Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control**, September 1-6, Chiba, Japan, 3, 35-40. 1996.

CATALÁN QUIROZ, Policarpo; MORENO, Jatziri; GALVÁN, Arturo; et al. Shaking table tests on strengthened adobe dwellings typical of Mexico. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 173, p. 1–48, 2019.

CHADRANDHARA, G. P. Introduction to Earthquake Engineering. **S. J. College of Engineering**. Mysuru, Índia, p. 1-148, 2018.

CHEN, Yueshi; WANG, Wei; CHEN, Yiyi. High-strength steel for resilience of beam-through frames. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 9, p. 664–676, 2017.

CONSTANTINOU, M. C.; SYMANS, M. D. Seismic Response of Structures with Supplemental Damping. **Structural Design of Tall Buildings**, 2(2), 77-92. 1993.

COOK, D. J., C. D. MULROW, and R. B. HAYNES. ‘Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions’, **Annals of Internal Medicine**, 126 (5) March, pp. 376–380. 1997.

DANOS econômicos causados por terremotos e tsunamis aumentaram mais de 67% em 20 anos. **ONU**. 2018. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2018/11/1645882>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

DENG, Zhiheng; HU, Qiang; ZENG, Jian; et al. Structural performance of steel-truss-reinforced composite joints under cyclic loading. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 171, n. 2, p. 130–148, 2018.

DENG, Zongcai; GAO, Lei; WANG, Xianyun. Glass fiber-reinforced polymer-reinforced rectangular concrete columns under simulated seismic loads. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, 2018.

DUAN, Liusheng; SU, Mingzhou. Seismic testing of high-strength steel eccentrically braced frames with a vertical link. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 11, p. 874–882, 2017.

DYKE, S.J., SPENCER, JR., B.F., SAIN, M.K., AND CARLSON, J.D. Experimental Verification of Semi-Active Structural Control Strategies Using Acceleration Feedback, **Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control**, September 1-6, Chiba, Japan, 3, 291-296. 1996.

DYKE, S.J., SPENCER, JR., B.F., SAIN, M.K., AND CARLSON, J.D. In press. Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction, **Smart Mater. Struc.** 1996.

ELSEVIER. **Scopus: Guia de referência rápido**. 2015. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/Scopus_Guia%20de%20refer%C3%Aancia%20r%C3%A1pida_10.08.2016.pdf>. Acesso em: 30 out. 2021.

ENAYATI, Hamed; ZAHRAI, Seyed Mehdi. A variably baffled tuned liquid damper to reduce seismic response of a five-storey building. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 171, n. 4, p. 306–315, 2018.

ERCOLE, Flávia Falci; MELO, Laís Samara de; ALCOFORADO, Carla Lúcia Goulart Constant. Revisão integrativa versus revisão sistemática. **Revista Mineira de Enfermagem**, v. 18, n. 1, p. 9-12, 2014.

FAPESP. **China à frente dos Estados Unidos**. Edição 281. 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/china-a-frente-dos-estados-unidos/>>. Acesso em: 21 jan. 2022.

FERENHOF, H. A.; FERNANDES, R. F. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: Método SSF. **Revista ACB**, v. 21, n. 3, p. 550–563, 2016.

FERENHOF, Helio Aisenberg; FERNANDES, Roberto Fabiano. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SFF. **Revista ACB**, [S.l.], v. 21, n. 3, p. 550-563, dez. 2016. ISSN 1414-0594. Disponível em: <<https://revista.acbsc.org.br/racb/article/view/1194>>. Acesso em: 27 out. 2018.

FHWA. Design Guidance: Geotechnical Earthquake Engineering For Highways. **Federal Highway Administration**. Washington, v. 1, p. 1-186, 1997.

FRATERNALI, F.; SANTOS, F. Mechanical modeling of superelastic tensegrity braces for earthquake-proof structures. **Extreme Mechanics Letters**, v. 33, p. 100578, 2019.

GANONG, L. H. Integrative reviews of nursing research. **Research in Nursing & Health**, Hoboken, v. 10, n. 1, p. 1-11, Mar. 1987.

GIONCU, Victor; MAZZOLANI, Federico. Earthquake Engineering for Structural Design. **Spon Press**. New York. p. 1-566, 2011.

GONÇALVES, Juliano Costa. Impactos e medidas econômicas relacionados a desastres. **Com ciência** n.117. Campinas. 2010. Disponível em: <http://comciencia.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-76542010000300009&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 25 Jan. 2022.

GHS. **Search Queries**. 2021. Disponível em: <https://growhackscale.com/glossary/search-queries>. Acesso em: 28 Dez, 2021.

GUERREIRO, Luís. Sistemas de Proteção Sísmica de Estruturas. Instituto Superior Técnico **ICIST**. 2007. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~luisg/textos/DFA_Estruturas.pdf>. Acesso em: 19 Jan. 2022.

HA, Soo Kyoung; YU, Sung Yong; KIM, Jae Suk. Experimental Study on Existing Reinforced Concrete Frames Strengthened by L-type Precast Concrete Wall Panels to Earthquake-Proof Buildings. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 9, p. 3579–3591, 63658915200000000.

HANSON, R.D., AIKEN, I.D., NIMS, D.K., RICHTER, P.J.; BACHMAN, R.E. State-of-the-Art and State-of-the-Practice in Seismic Energy Dissipation, Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, CA, March 11-12, Volume 2; Passive Energy Dissipation, Active Control, and Hybrid Control Systems, **Applied Technology Council**, Redwood City, CA, 449-47. 1993.

HOU, Gangling; LI, Meng; HAI, Sun; et al. Innovative seismic resistant structure of shield building with base isolation and tuned-mass-damping for AP1000 nuclear power plants. **Engineering Computations: Int J for Computer-Aided Engineering**, v. 36, n. 4, p. 1238–1257, 2019.

LIBARDONI, Vinicius. "A China é hoje o país que mais investe em projetos de infraestrutura cultural". **ArchDaily Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/966422/a-china-e-hoje-o-pais-que-mais-investe-em-projetos-de-infraestrutura-cultural>>. Acesso em: 10 Jan. 2022

JAMSHIDI, Morteza; MAJID, Taksiah A. Seismic retrofit of slab-on-girder steel bridges. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 7, p. 521–531, 2017.

JANGID, Radhey Shyam. **National Programme on Technology Enhanced Learning**, 2013. Introduction to Earthquake Engineering. Disponível em: <<https://archive.nptel.ac.in/courses/105/101/105101004/>> Acesso em: 25 nov. 2021.

JESSON, J.K., MATHESON, L. LACEY, F.M. (2011), “Doing Your Literature Review: Traditional and Systematic Techniques,” **SAGE Publications Ltd**, Los Angeles, LA.

JIANG, Zi-qin; LAN, Tao; DOU, Chao; et al. Cyclic loading tests of earthquake-resilient prefabricated cross joint with single flange cover plate. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 164, p. 105752, 2020.

JIANG, Zi-Qin; YANG, Xiao-Feng; DOU, Chao; et al. Design theory of earthquake-resilient prefabricated beam-column steel joint with double flange cover plates. **Engineering Structures**, v. 209, p. 110005, 2020.

JULIN, Wang. A seismic-shielding structure based on phononic crystal. **Institute of Building Structures**, Shanxi Architectural College. XueFu Street, 030006. Taiyuan. China. 2020.

KAPTAN, Kubilay. Effectiveness of externally bonded FRP systems in strengthening of RC structures in seismic areas. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 5, p. 362–375, 2017.

KE, Ke; CHEN, Yiyi; JIA, Liang-Jiu. Damage-control evaluation of high-strength steel frames with energy dissipation bays. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 9, p. 677–692, 2017.

KELLY, J.M.; WAY, D. Economic Feasibility and Seismic Rehabilitation of Existing Buildings Via Base Isolation. Seismic Retrofit of Historic Buildings Conference Workbook,

Proceedings of the Second Technical Conference on the Seismic Retrofit of Historic Buildings, San Francisco, November 17-19. Look, D.L., Ed., **Western Chapter of the Association of Preservation Technology**, San Francisco. 1991.

LIU, A.; CARRADINE, D. Seismic bracing performance of plasterboard timber walls. **Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering**, 52(2), 56–66. 2019.

LIU, Dianzhong; LIU, Han; ZHANG, Feipeng. Behaviour of the joint between slabs and walls composed of light steel and foam concrete. **Advances in Structural Engineering**, v. 24, n. 11, p. 2427–2440, 2021.

LOSANNO, Daniele; CALABRESE, A.; MADERA-SIERRA, I.; et al. Recycled versus Natural-Rubber Fiber-Reinforced Bearings for Base Isolation: Review of the Experimental Findings. **Journal of Earthquake Engineering**, p. 1–20, 2020.

LUCO, J.E.; MITA, A. Active Control of The Seismic Response of Tall Non-Uniform Buildings, **Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering**, 19-24 July, Madrid; A A Balkema, Rotterdam, 4, 2143-2148. 1992.

LUK, S. H.; KUANG, J. S. Seismic performance and force transfer of wide beam–column joints in concrete buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - **Engineering and Computational Mechanics**, v. 170, n. 2, p. 71–88, 2017.

MARINKOVIĆ, Marko; BUTENWEG, Christoph. Earthquake-proof system for masonry infills in RC frame structures. **International Journal of Masonry Research and Innovation**, v. 5, n. 2, p. 185, 2020.

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. P.; GALVÃO, C.M. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto Contexto Enfermagem**, Florianópolis, v. 17, n. 4, p. 758-764, out/dez. 2008.

MICROSOFT. O que é Power BI? **Microsoft Docs**, 2022. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/pt-br/power-bi/fundamentals/power-bi-overview>>. Acesso em: 25 jan. 2022.

MOHAMMADI, Majid. Optimum engineered infilled frames and the influence of openings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 5, p. 354–361, 2017.

MOLINA, Eder Cassola; RIBEIRO, Fernando Brenha. Sismologia. **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**, Universidade de São Paulo. 2022. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/~eder/EAD/apostilas/Geofisica_top01.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MORALES, Enrique; FILIATRAULT, Andre; AREF, Amjad. Seismic floor isolation using recycled tires for essential buildings in developing countries. **Bulletin of Earthquake Engineering**, v. 16, 2018.

NABID, Neda; HAJIRASOULIHA, Iman; ESCOLANO MARGARIT, David; et al. Optimum energy based seismic design of friction dampers in RC structures. **Structures**, v. 27, p. 2550–2562, 2020.

NAEEM, Asad; KIM, Jinkoo. Seismic retrofit of 3000 kVA power transformer using friction dampers and prestressed tendons. **Structures**, v. 32, p. 641–650, 2021.

NAHVINIA, Mohammad Ali; TASNIMI, Abbas Ali. Load transfer by a studed steel coupling beam to a reinforced concrete shear wall. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 174, n. 10, p. 885–899, 2021.

NOUREL-DIN, Mohamed; KIM, Jinkoo; NAEEM, Asad. Seismic Performance Evaluation of a Structure Retrofitted Using Steel Slit Dampers with Shape Memory Alloy Bars. **International journal of steel structures**, v. 17, p. 1627–1638, 2017.

OS 10 terremotos mais potentes e com maior número de mortos da história da América Latina. **BBC**. 2017. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-41380495>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

PARK, Hyo Seon; CHOI, Se Woon; OH, Byung Kwan. Optimal seismic retrofit model for steel moment resisting frames with brittle connections. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, v. 17, p. 835–847, 2018.

PENG, Yongbo; DING, Luchuan; CHEN, Jian-Bing; et al. Experimental Study of Sliding Hydromagnetic Isolators for Seismic Protection. **Journal of Structural Engineering**, v. 145, p. 04019021, 2019.

PIERRO, B. Ciência em evolução, 2014. **Pesquisa FAPESP**. Disponível em <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2014/08/21/ciencia-em-evolucao>> Acessado em: 26 jan. 2018.

PROCHAZKOVA, Dana. Principles of the Seismology and Seismic Engineering. **Czech Technical University in Praha**. 2011. Disponível em; <<https://oecd-nea.org/nsd/csni/iage/workshops/rez-2011/documents/seismology-seismic-engineering.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2022.

RISTIC, Jelena; MISINI, Misin; RISTIC, Danilo; et al. Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Shaking table tests on large-scale model Authors: Original scientific paper Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Shaking table tests on large-scale model. **Gradevinar**, v. 70/2018, p. 463–485, 2018.

ROMAN, Arlete Regina; FRIEDLANDER, Maria Romana. Revisão integrativa de pesquisa aplicada à enfermagem. **Cogitare Enfermagem**, v. 3, n. 2, 1998.

RUGGIERI, Nicola. New Insights on the Borbone Construction System: a Peculiar 18th Century Retrofitting Solution for Earthquake Damaged Churches. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 0, n. 0, p. 1–17, 2021.

SALVI, Jonathan; PIOLDI, Fabio; RIZZI, Egidio. Optimum Tuned Mass Dampers under seismic Soil-Structure Interaction. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 114, p. 576–597, 2018.

SÁNCHEZ, F. V. Los terremotos y sus causas. **Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos**. 24 p. 1994.

SANTOS, Antonio Carlos F.; AGUIAR, Carlos Eduardo. Ondas e terremotos. **Instituto de Física**, 5 p. 2012.

SARTAJI, Parisa; S. MOGHADAM, Abdolreza; GHAFORY-ASHTIANY, Mohsen. Interaction of masonry walls and shear walls in masonry buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 171, p. 1–15, 2017.

SCAWTHORN, C. “Earthquake Engineering”. Structural Engineering Handbook. **CRC Press LCC**, v. 1, p. 1–85, 1999.

SOONG, T.T; COSTANTINOU, M.C. Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering, CISM International Centre for Mechanical Sciences, Vol. 345, **SpringerVerlag, New York**. 1994.

SOUL, Hugo; YAWNY, Alejandro. Applicability of superelastic materials in seismic protection systems: A parametric study of performance in isolation of structures. **Smart Materials and Structures**, v. 26, 2017.

STANFORD UNIVERSITY. **Earthquake Engineering**. Civil and Environmental Engineering. 2021. Disponível em: <<https://cee.stanford.edu/academics-admission/degree-programs/graduate/phd-and-masters-degree-programs/structural-4>>. Acesso em: 18 Jan. 2022.

SUCUOGLU, Haluk; AKKAR, Sinan. Basic Earthquake Engineering: From Seismology to Analysis and Design. **Springer International Publishing Switzerland**. v. 1, p. 1-288. 2014.

TONNA, Sandra; RUGGIERI, Nicola; CHESI, Claudio. Comparison between Two Traditional Earthquake-Proof Solutions: Borbone and Lefkada Timber-Frame Systems Journal of Architectural Engineering, Vol. 24, Issue 4 (December 2018) © 2018 **American Society of Civil Engineers**. **Journal of Architectural Engineering**, v. Vol. 24, 2018.

TRAN, Tung M.; HADI, Muhammad N. S. Shear strength model of reinforced-concrete exterior joint under cyclic loading. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, n. 8, p. 603–617, 2017.

WEI, Minghai; HU, Gang; LI, Lixiao; et al. Development and theoretically evaluation of an STF–SF isolator for seismic protection of structures. *Meccanica*, v. 53, n. 4, p. 841–856, 2018.

XIE, Qun; XUE, Song; XU, Lei. Post-earthquake fire behaviour of steel-to-concrete joints using post-installed anchorages. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 174, n. 2, p. 117–131, 2021.

ZAPATA, Ana Maria Cortés; SCHNEIDER, John; PAGANI, Marco; SILVA, Vitor. Global Earthquake Hazard Map. **Revista Geociências SURA**. Colômbia, n. 5, p. 4-9, 5 de set. 2019.

ZHANG, Yongxing; PENG, Hui; WEIHUA, Lv. Evaluation of strain-hardening cementitious composites for RC seismic strengthening. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 170, p. 1–11, 2017.

ZHAO, Hong-Chao; YE, Yu-Yi; ZENG, Jun-Jie; et al. Polyethylene terephthalate fibre-reinforced polymer-confined concrete encased high-strength steel tube hybrid square columns: Axial compression tests. **Structures**, v. 28, 2020.

ZHONG, Jitao; WANG, Lai; LI, Yunfeng; et al. Solving the mystery of China's thousand-year-old wooden pagoda. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, v. 170, n. 4, p. 169–173, 2017.

APÊNDICE A – 48 artigos utilizados para a revisão de literatura

Tabela 11 - Resultados da Revisão Integrativa de Literatura

| N° | Título Original | Ano de Publicação | Autor(es) | País |
|----|---|-------------------|--|---------------|
| 1 | Solving the mystery of China's thousand-year-old wooden pagoda | 2017 | Zhong, J., Wang, L., Li, Y., Zhou, M. | China |
| 2 | Optimum earthquake-tuned TMDs: Seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses | 2017 | Salvi, J., Rizzi, E. | Itália |
| 3 | Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels | 2017 | Hashemi, B.H., Moaddab, E. | Irã |
| 4 | Seismic performance evaluation of a structure retrofitted using steel slit dampers with shape memory alloy bars | 2017 | Naeem, A., Eldin, M.N., Kim, J., Kim, J. | Coréia do Sul |
| 5 | Improving seismic performance of segmental precast post-tensioned bridge piers | 2017 | Amini, M., Mirtaheri, M., Zandi, A.P. | Irã |
| 6 | Applicability of superelastic materials in seismic protection systems: A parametric study of performance in isolation of structures | 2017 | Soul, H., Yawny, A. | Argentina |
| 7 | Evaluation of strain-hardening cementitious composites for RC seismic strengthening | 2017 | Zhang, Y., Peng, H., Lv, W. | China |
| 8 | Effectiveness of externally bonded FRP systems in strengthening of RC structures in seismic areas | 2017 | Kaptan, K. | Turquia |
| 9 | Seismic testing of high-strength steel eccentrically braced frames with a vertical | 2017 | Duan, L., Su, M. | China |
| 10 | Shear strength model of reinforced-concrete exterior joint under cyclic loading | 2017 | Tran, T.M., Hadi, M.N.S. | Austrália |
| 11 | Seismic performance and force transfer of wide beam-column joints in concrete buildings | 2017 | Luk, S.H., Kuang, J.S. | China |

| | | | | |
|----|---|------|--|----------------|
| 12 | Seismic performance of deficient masonry infill reinforced-concrete structures | 2017 | Ali, M.U., Khan, S.A., Anwar, M.Y., Aleem, A., Raza, S., Maqbool, U. | China |
| 13 | Damage-control evaluation of high-strength steel frames with energy dissipation bays | 2017 | Ke, K., Chen, Y., Jia, L.-J. | China |
| 14 | Optimum engineered infilled frames and the influence of openings | 2017 | Mohammadi, M. | Irã |
| 15 | High-strength steel for resilience of beam-through frames | 2017 | Chen, Y., Wang, W., Chen, Y. | China |
| 16 | Seismic retrofit of slab-on-girder steel bridges | 2017 | Jamshidi, M., Majid, T.A. | Irã |
| 17 | Comparison between Two Traditional Earthquake-Proof Solutions: Borbone and Lefkada Timber-Frame Systems | 2018 | Tonna, S., Ruggieri, N., Chesì, C. | Itália |
| 18 | Optimum Tuned Mass Dampers under seismic Soil-Structure Interaction | 2018 | Salvi, J., Pioldi, F., Rizzi, E. | Itália |
| 19 | A variably baffled tuned liquid damper to reduce seismic response of a five-storey building | 2018 | Enayati, H., Zahrai, S.M. | Irã |
| 20 | Development and theoretically evaluation of an STF-SF isolator for seismic protection of structures | 2018 | Wei, M., Hu, G., Li, L., Liu, H. | China |
| 21 | Seismic floor isolation using recycled tires for essential buildings in developing countries | 2018 | Morales, E., Filiatrault, A., Aref, A. | Estados Unidos |
| 22 | Glass fiber-reinforced polymer-reinforced rectangular concrete columns under simulated seismic loads | 2018 | Deng, Z., Gao, L., Wang, X. | China |
| 23 | Structural performance of steel-trussreinforced composite joints under cyclic loading | 2018 | Deng, Z., Hu, Q., Zeng, J., Xiang, P., Xu, C. | China |
| 24 | Experimental Study on Existing Reinforced Concrete Frames Strengthened by L-type Precast Concrete Wall Panels to Earthquake-Proof Buildings | 2018 | Ha, S.K., Yu, S.Y., Kim, J.S. | Coréia do Sul |
| 25 | Interaction of masonry walls and shear walls in masonry buildings | 2018 | Sartaji, P., Moghadam, A.S., Ghafory Ashtiany, M. | Irã |
| 26 | Optimal seismic retrofit model for steel moment resisting frames with brittle connections | 2018 | Park, H.S., Choi, S.W., Oh, B.K. | Coréia do Sul |

| | | | | |
|----|---|------|--|----------------|
| 27 | Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Analytical study validated by shaking table testing | 2019 | Misini, M., Ristić, J., Ristić, D., Guri, Z., Pillana, N. | Macedônia |
| 28 | Recycled Rubber Fiber Reinforced Bearings (RR-FRBs) as base isolators for residential buildings in developing countries: The demonstration building of Pasir Badak, Indonesia | 2019 | Calabrese, A., Losanno, D., Spizzuoco, M., Strano, S., Terzo, M. | Itália |
| 29 | Experimental Study of Sliding Hydromagnetic Isolators for Seismic Protection | 2019 | Peng, Y., Ding, L., Chen, J., Villaverde, R. | China |
| 30 | Seismic bracing performance of plasterboard timber walls | 2019 | Liu, A., Carradine, D. | Nova Zelândia |
| 31 | Mechanical modeling of superelastic tensegrity braces for earthquake-proof structures | 2019 | Fraternali, F., Santos, F. | Itália |
| 32 | Innovative seismic resistant structure of shield building with base isolation and tuned-mass-damping for AP1000 nuclear power plants | 2019 | Hou, G., Li, M., Hai, S., Song, T., Wu, L., Li, Y., Zheng, G., Shen, F., Chen, Y. | China |
| 33 | Optimum energy based seismic design of friction dampers in RC structures | 2020 | Nabid, N., Hajirasouliha, I., Escolano Margarit, D., Petkovski, M. | Reino Unido |
| 34 | A seismic-shielding structure based on phononic crystal | 2020 | Wang, J. | China |
| 35 | Effects of the long-term aging of glass-fiber reinforced bearings (FRBs) on the seismic response of a base-isolated residential building | 2020 | Calabrese, A., Losanno, D., Barjani, A., Spizzuoco, M., Strano, S. | Estados Unidos |
| 36 | Recycled versus Natural-Rubber Fiber-Reinforced Bearings for Base Isolation: Review of the Experimental Findings | 2020 | Losanno, D., Calabrese, A., Madera-Sierra, I.E., Spizzuoco, M., Marulanda, J., Thomson, P., Serino, G. | Itália |
| 37 | Polyethylene terephthalate fibre-reinforced polymer-confined concrete encased high-strength steel tube hybrid square columns: Axial compression tests | 2020 | Zhao, H.-C., Ye, Y.-Y., Zeng, J.-J., Zhou, J.-K., Ouyang, Y. | China |
| 38 | Application of carbon-fibre-reinforced polymer to low-strength concrete bridge piers | 2020 | Saeed H.Z., Khan Q.U.Z., Iqbal M., Ahmed A. | Paquistão |

| | | | | |
|----|--|------|---|---------------|
| 39 | Cyclic loading tests of earthquake-resilient prefabricated cross joint with single flange cover plate | 2020 | Jiang, Z.-Q., Lan, T., Dou, C., Wu, Y.-X., Zhang, H. | China |
| 40 | Design theory of earthquake-resilient prefabricated beam-column steel joint with double flange cover plates | 2020 | Jiang, Z.-Q., Yang, X.-F., Dou, C., Pi, Y.-L., Li, R. | China |
| 41 | Earthquake-proof system for masonry infills in RC frame structures | 2020 | Marinković, M., Butenweg, C. | Sérvia |
| 42 | Shaking table tests on strengthened adobe dwellings typical of Mexico | 2020 | Catalán-Quiroz, P., Moreno-Martínez, J.Y., Galván, A., Arroyo-Matus, R. | México |
| 43 | Seismic retrofit of 3000 kVA power transformer using friction dampers and prestressed tendons | 2021 | Naeem, A., Kim, J. | Coréia do Sul |
| 44 | Upgrading seismically isolated bridges with space-flange energy-dissipation devices | 2021 | Misini, M., Ristic, J., Guri, Z., Ristic, D., Pllana, N. | Sérvia |
| 45 | Load transfer by a studded steel coupling beam to a reinforced concrete shear wall | 2021 | Nahvinia, M.A., Tasnimi, A.A. | Irã |
| 46 | Post-earthquake fire behaviour of steel-to-concrete joints using post-installed anchorages | 2021 | Xie, Q., Xue, S., Xu, L. | China |
| 47 | Behaviour of the joint between slabs and walls composed of light steel and foam concrete | 2021 | Liu, D., Liu, H., Zhang, F. | China |
| 48 | New Insights on the Borbone Construction System: a Peculiar 18th Century Retrofitting Solution for Earthquake Damaged Churches | 2021 | Ruggieri, N. | Itália |
