

AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS EM ANGOLA

OSVALDO ANTÓNIO FONSECA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIDADE DE ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum

Coorientador: Professor Doutor Vitor Emanuel Silva

JULHO DE 2020

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2018/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mestec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400 Fax +351-22-508 1440 ✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Em Estruturas de Engenharia Civil – 2018/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À família e amigos

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos vão para minha família no geral e em especial aos irmãos, filhos e sobrinhos. Um reconhecimento e gratidão ao amigo e mentor, Dr. Carlos Panzo pelo permanente apoio moral durante a fase de formação ao nível da pós-graduação. Outro reconhecimento vai ao Engenheiro Abimael Paca pela amizade e apoio ao longo deste período. Ao meu Orientador e Coorientador, Professor Doutor Humberto Salazar Varum e Professor Doutor Vitor Emanuel Silva, respectivamente, pela orientação e conhecimentos transmitidos ao longo do processo de aulas e, em especial, durante a fase de elaboração da dissertação. A todos que directa ou indirectamente prestaram o seu apoio, muito obrigado.

RESUMO

A avaliação do risco sísmico à escala nacional representa uma poderosa ferramenta para a definição de medidas para redução de potenciais perdas económicas, resultantes de terremotos futuros. Pelo facto de não se registarem eventos sísmicos de magnitudes consideráveis nos últimos tempos e inexistência na história sobre eventos que tenham causado danos severos, Angola é considerado um país de baixa sismicidade.

Neste sentido, o presente estudo apresenta uma avaliação do risco sísmico do país, resultado da confluência da perigosidade sísmica, vulnerabilidade estrutural e exposição do parque edificado. Dada a insuficiência de informação, os modelos foram desenvolvidos recorrendo à extrapolação de dados de outros países para a realidade angolana, realizando, para o efeito, as devidas adaptações.

O modelo de perigosidade foi elaborado considerando as acelerações do solo para o período de retorno de 475 anos, disponibilizada através da base de dados do *Global Earthquake Model* (GEM). Para a definição da vulnerabilidade estrutural foram utilizadas funções de vulnerabilidade estrutural desenvolvidos pelo GEM para o continente africano, a partir das quais se determinaram os níveis danos e os consequentes rácios de perdas (*loss ratio*) das estruturas em função do nível de aceleração do solo, convertida em aceleração espectral. A determinação da quantidade de edifícios expostos aos cenários sísmicos foi efectuada com base na informação extraída do censo populacional que congrega dados sobre os materiais de construção dos agregados familiares. As perdas económicas foram determinadas com base em informação sobre o mercado de construção do país, através das áreas brutas dos fogos habitacionais, e nos custos por m² para cada tipo de habitação, considerando diferentes níveis de qualidade.

O presente estudo científico permitiu concluir que o país, realmente, tem níveis de perigosidade baixos para acelerações de solo para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos. Entretanto, as fragilidades estruturais identificadas e a quantidade de edifícios expostos à perigosidade podem levar a perdas económicas consideráveis. Tal facto desperta para a necessidade de se continuar a realizar estudos relativamente à avaliação do risco sísmico, em especial do modelo de vulnerabilidade estrutural do parque edificado do país.

Palavras chaves: Perigosidade sísmica, Exposição, Vulnerabilidade estrutural, Risco sísmico, Angola.

ABSTRACT

The assessment of the seismic risk at a national scale represents a powerful tool for defining the measures to reduce potential economic losses, due to future earthquakes. Due to the fact that seismic events of considerable magnitude have not been recorded recently and there is no historical data of events that have caused severe damage, Angola is considered a low seismicity country. However, economic losses can be determined through seismic risk assessment.

So, this scientific study presents an approach that allowed an assessment of the country's seismic risk, resulting from the confluence of seismic hazard, structural vulnerability and exposure of the building stock. Given the lack of information, the models were developed using the extrapolation of data from other countries to the Angolan reality, performing the required adaptations.

The seismic hazard model was performed, considering the soil accelerations for a return period of 475 years, which data is available from the database of the Global Earthquake Model (GEM). To defining structural vulnerability, structural vulnerability functions, developed by GEM for the African continent, were used from which damage levels and consequent loss ratios of structures were determined according to the level of soil acceleration, turned into spectral acceleration. The determination of the number of buildings exposed to seismic scenarios was carried out based on information from the population census that gathers data on the construction materials of the households. Economic losses were determined based on information on the country's construction market, through the gross areas of houses and the costs per square meter for each type of house at different quality levels.

The scientific study leads us to a conclusion that the country, in fact, has low levels of seismicity, considering the soil accelerations for the probability of exceeding 10% in 50 years and a return period of 475 years. However, the structural fragilities and vulnerabilities, and the number of buildings exposed to seismic hazard can lead to considerable economic losses. Such situation draws our attention to the requirement of further research on the seismic risk assessment, especially the structural vulnerability of the country's building stock.

Key words: Seismic Hazard, Exposure, Structural Vulnerability, Seismic Risk, Angola.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V

1 INTRODUÇÃO

1

1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ACTIVIDADES SÍSMICA	2
1.2.1. CONCEITOS GERAIS	2
1.2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTUDOS ANTERIORES	5
1.3. EFEITOS DOS SISMOS NAS ESTRUTURAS	8
1.4. MOTIVAÇÃO	13
1.5. OBJECTIVOS	13
1.6. METODOLOGIA	14
1.7. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	15

2 HISTÓRIA DA SISMICIDADE DE ANGOLA

17

2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	17
2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E GEOLÓGICA	17
2.3. CARACTERIZAÇÃO E EVOLUÇÃO DAS UNIDADES GEOTECTÓNICAS DE ANGOLA	23
2.4. PRINCIPAIS EVENTOS SÍSMICOS	25
2.4.1. PRINCIPAIS EVENTOS NO MUNDO E ÁFRICA	25
2.4.2. PRINCIPAIS EVENTOS EM ANGOLA	27
2.4.3. TEMPO DE RECORRÊNCIA	31
2.5. ZONEAMENTO SÍSMICO DE ANGOLA	32
2.6. MONITORIZAÇÃO DOS EVENTOS SÍSMICOS	34

3 PERIGOSIDADE SÍSMICA

37

3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. MODELO DE PERIGOSIDADE	38
3.2.1. EQUAÇÕES DE PREDIÇÃO DA VIBRAÇÃO DO SOLO E LEIS DE ATENUAÇÃO	39
3.2.1.1. Lei de Gutenberg-Richter (G-R) e abordagens modernas	39
3.2.1.2. Lei de Omori e agrupamentos de terremotos	40
3.2.2. CONSIDERAÇÕES DAS CONDIÇÕES DO SOLO	42
3.2.3. RESULTADOS	45

3.2.3.1. Curvas de perigosidade.....	45
3.2.3.2. Mapas de perigosidade	46
3.2.3.3. Proposta de zoneamento sísmico de Angola.....	48
3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS	49

4 EXPOSIÇÃO

51

4.1. INTRODUÇÃO	51
4.2. CENSO POPULACIONAL	52
4.3. EVOLUÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL	56
4.4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE EXPOSIÇÃO	57
4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL DE ANGOLA.....	57
4.4.2. ESTIMATIVA DO VALOR ECONÓMICO DAS EDIFICAÇÕES.....	64
4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.5.1. VALOR ECONÓMICO – DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA.....	69
4.5.2. EXPOSIÇÃO DE EDIFÍCIOS À PERIGOSIDADE	70
4.6. LIMITAÇÕES E ASSUNÇÕES.....	71

5 VUNERABILIDADE ESTRUTURAL

73

5.1. INTRODUÇÃO	73
5.2. PRÁTICAS DE PROJECTOS EM ANGOLA	73
5.2.1. REGULAMENTAÇÃO CONSIDERADA NO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS	74
5.2.2. CRITÉRIOS ADOTADOS PARA A CONSIDERAÇÃO DA FORÇA SÍSMICA.....	75
5.2.2.1. Zonas sísmicas.....	75
5.2.2.2. Espectros de resposta.....	76
5.2.2.3. Combinação da acção sísmica	79
5.3. IRREGULARIDADES ESTRUTURAIS	80
5.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA	82
5.4.1. MÉTODOS QUALITATIVOS OU EMPÍRICOS	83
5.4.2. MÉTODOS QUANTITATIVOS OU ANALÍTICOS	84
5.4.3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS	85
5.5. MODELO DE VULNERABILIDADE DE ANGOLA	86
5.5.1. CURVAS DE FRAGILIDADE	86
5.5.2. CURVAS DE VULNERABILIDADE	90
5.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	92

6 AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO	95
6.1. INTRODUÇÃO	95
6.2. SOBREPOSIÇÃO DA VULNERABILIDADE VS. PERIGOSIDADE	100
6.3. MAPAS DE RÁCIOS DE PERDAS E RESPECTIVAS PERDAS ECONÓMICAS	102
 7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	 107
7.1. CONCLUSÕES GERAIS	107
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	109
 BIBLIOGRAFIA	 111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Perdas económicas de eventos sísmicos relevantes (Romão, 2012)	2
Figura 1.2 - Leitura de amplitude em sismógrafo (Adaptada de Lindeburg e McMullin, 2008)	3
Figura 1.3 - Mapa de perigosidade sísmica de África. Fonte: GEM, retirada aos 02/08/2019 https://hazard.openquake.org/gem/models/WAF/	7
Figura 1.4 - Mapa de risco sísmico de África (GEM, retirada aos 02/08/2019, https://maps.openquake.org/map/global-seismic-risk-map/#5/-10.393/14.054)	7
Figura 1.5 - Caso de colocação de elementos a ligar duas estruturas (à esquerda) e altura diferentes entre pisos e elementos não estruturais (à direita). Localização: Kobe - Japão, 1995	11
Figura 1.6 Casos de danos causados por pilares curtos	11
Figura 1.7 - Caso de variação dos elementos em altura (diferenças de altura entre pisos e ausência de elementos não estruturais).....	11
Figura 1.8 - Caso de variação dos elementos em altura (diferenças de altura entre pisos e ausência de elementos não estruturais)	12
Figura 1.9 - Exemplo de fraca resistência ao corte do nó de ligação – sismo de Petino.....	12
Figura 1.10 - Inclinação de tanques de oxigénio (esquerda) e fractura frágil do Circuit breaker (direita) no sismo de 1999 Turquia – (Elnashai & Di Sarno, 2008)	12
Figura 1.11 - Danos em elementos não estruturais, causados, eventualmente, por fracos apoios, má ligação com os elementos estruturais, falta de amarrações, etc - L'Áquila, Itália, 2009.	13
Figura 2.1 - Mapa político e administrativo de Angola (Fonte: Adaptado de BONDO, 2014)	17
Figura 2.2 - Mapa geomorfológico de Angola (Marques, 1977).....	19
Figura 2.3 - Carta geológica de Angola (Araújo et al. 1988).....	21
Figura 2.4 - Versão simplificada da carta generalizada de solos de Angola, 4ª aproximação (Ricardo, Raposo1 & Madeira, 2005)	23
Figura 2.5 - Esboço tectónico de Angola (Silva, 1974).....	25
Figura 2.6 - Distribuição geográfica dos sismos, ocorridos até o período de 30 dias com M>4 na escala de Richter (IMPA, Junho 2020, https://www.ipma.pt/pt/geofisica/sismicidade/)	26
Figura 2.7 - Principais sismos em África desde o ano 1600 (Fonte: USGS, 09-07- 2019, https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/).....	27

Figura 2.8 - Principais eventos sísmicos em Angola (Fonte: USGS, 09-07- 2019, https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/)	30
Figura 2.9 - Distribuição temporal da sismicidade histórica angolana (Neto, 2014).....	30
Figura 2.10 - Distribuição temporal da sismicidade Instrumental angolana. Fonte: (Neto, 2014)	31
Figura 2.11 - Tempo de recorrência para magnitude histórica (esquerda) e para magnitude instrumental (direita). Fonte: (Neto, 2014).....	32
Figura 2.12 - Mapa com as regiões sísmicas de Angola (áreas ranhuradas) no período entre 1943-1964 (Moreira, 1968)	32
Figura 2.13 - Mapa de Sismicidade histórica e instrumental de Angola, período 1914 a 2014 (Neto, 2014).....	33
Figura 2.14 - Localização da rede sismográfica de Capanda (Neto, 2014).....	35
Figura 3.1 - Zonas sísmicas do modelo do Oeste de África (em amarelo) e catálogo sísmico do GEM para África Central (GEM-CAEC). O limite do catálogo sísmico é marcado com a linha descontinua (GEM, 2018).....	38
Figura 3.2 - Tempo entre eventos versus número sequencial de eventos para sismos com $M > 2.5$ no novo catálogo sísmico da Itália (Gasperini et al., 2013).....	41
Figura 3.3 - Igual à Fig. 22, com ampliação da última parte para mostrar detalhes sobre o agrupamento de eventos (Gasperini et al., 2013).....	41
Figura 3.4 - Mapa de V_{s30} para o território de Angola, determinado com base nos limites geográficos entre províncias e nas unidades geológicas de Angola com as correspondentes definidas por (Willis e Clahan, 2006) e (Stewart et al., 2008). Fonte: Autor	45
Figura 3.5 - Curvas de perigosidade calculada para diferentes períodos espectrais para cidade de Accra, capital do Gana. (Fonte: https://hazard.openquake.org/gem/models/WAF/).....	46
Figura 3.6 - Mapa de Aceleração de pico do solo (PGA).....	47
Figura 3.7 - Zonas sísmicas de Angola	48
Figura 3.8 - Classificação da sismicidade em território nacional.....	49
Figura 4.1 - População Angolana distribuída pro províncias – Fonte: INE, 2016	53
Figura 4.2 - População angolana distribuída pelas áreas urbana e rural – Fonte: INE, 2016	53
Figura 4.3 - Agregados familiares/unidades habitacionais distribuídas pelas áreas urbanas vs. Rural – Fonte: INE, 2016.....	54
Figura 4.4 - Materiais de construção usado nas paredes – Fonte: INE, 2016	55

Figura 4.5 - Materiais de construção usado nas paredes – Fonte: INE, 2016.....	56
Figura 4.6 - Evolução da tipologia construtiva de Portugal, características principais (à esquerda) e representação da evolução na linha do tempo (à direita) Fonte: (Ferrito, T, 2014; Coias e Silva, 2001)	57
Figura 4.7 - Distribuição do stock habitacional de Angola nas zonas urbana e rural (Autor). 67	
Figura 4.8 - Número de moradias/habitações (milhares) - Fonte: (INE, 2016).....	67
Figura 4.9 - Fracções de moradias na área com base nas classes estruturais dos edifícios (Fonte: autor).....	68
Figura 4.10 - Mapa do stock do parque edificado de Angola, com as classes de edifícios distribuídos por províncias (Fonte: autor)	69
Figura 4.11 - Valor económico distribuído pelas áreas urbana e rural (bilhões de USD) - Fonte: autor	69
Figura 4.12 – Custo de reposição das construções (bilhões de USD) Fonte: autor	70
Figura 4.13 - Exposição das frações de edifícios à perigosidade sísmica – Fonte: autor	71
Figura 5.1 - Zonamento sísmico da NP EN 1998-1 para o cenário de sismo afastado/sismo interplacas (à esquerda) e para o cenário de sismo próximo/sismo intraplaca (à direita) (Carvalho, 2007)	76
Figura 5.2 - Forma do espectro de resposta elástica – Fonte: EC8 (CEN, 2010).....	77
Figura 5.3 - Espectros de resposta elástica para sismo do tipo 1 (à esquerda) e do tipo 2 (à direita).....	78
Figura 5.4 - Critério para regularidade em planta. Fonte: Transparências da UC Eng ^a Sísmica (2019)	81
Figura 5.5 - Critérios de regularidade de edifícios com recuo (CEN, 2010).....	82
Figura 5.6 - curvas de fragilidade adaptadas para as classes CR/LFM+DUC/HBET:4,7 (à esquerda) e CR/LWAL+DUC (à direita). (Martinez & Gustavo, 2012).	87
Figura 5.7 - curvas de fragilidade adaptadas para as classes MCF+CBH+MOC/LPB+DNO (à esquerda) e MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1 (à direita). (Villar-Veja, 2014).....	87
Figura 5.8 - Curvas de fragilidade adaptadas para as classes MUR+ADO (à esquerda) e ME+MEO, MATO, MUR+STDRE/HBET:1,2; UNK (à direita). (Villar-Veja, 2014).....	88
Figura 5.9 - curvas de fragilidade adaptadas para as classes W+WS/HBET:1. (Liao et al, 2006).....	88

Figura 5.10 - Curvas de vulnerabilidades, classe CR/LINF+DNO (à esquerda) e CR/LINF+DUC (à direita). (Martins e Silva, 2018).	90
Figura 5.11 - Curvas de vulnerabilidades, classe MCF/H:1-2 (à esquerda) e MUR+ADO/HBET:1 (à direita). Fonte: Martins e Silva, 2018.....	92
Figura 5.12 - Curvas de vulnerabilidades, classe W+WHE/HBET:1 (à esquerda) e UNK (à direita). Fonte: Martins e Silva, 2018.....	92
Figura 5.13 - Distribuição de números de edifícios por funções de vulnerabilidade. Fonte: autor.....	93
Figura 6.1 - Modelo conceptual de determinação de risco – abordagem holística (Carreño, 2006).....	97
Figura 6.2 - Algoritmo de determinação de risco baseado em eventos probabilístico (a esquerda) e Algoritmo de determinação do risco baseado no método clássico do PSHA (direita) - (Silva et al., 2013).	100
Figura 6.3 - Sobreposição das funções de vulnerabilidade sobre a perigosidade. Fonte: autor	101
Figura 6.4 - Distribuição do valor médio do loss ratio por província (à esquerda) e valor médio do loss ratio para cada função de vulnerabilidade (à direita). Fonte: autor	103
Figura 6.5 - Perdas económicas esperadas, distribuídas por classes de vulnerabilidade, para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e período de retorno de 475 anos. Fonte: Autor	103
Figura 6.6 - Perdas económicas, distribuídas por províncias, para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e período de retorno de 475 anos. Fonte: Autor.....	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1- Danos comuns à estruturas causadas por acções sísmicas. Fonte: Adaptado de Elnashai, (2008)	10
Tabela 3.1 - Correspondência entre as unidades geológicas de Angola com as categorias equivalentes em Willis e Clahan 2006 e Stewart et al 2008	43
Tabela 3.2 - Unidades geológicas predominantes e V_{s30} por província (Adaptado das cartas geológicas e dos solos de Angola)	44
Tabela 3.3 - Valores de PGA (m/s^2) - Fonte: OpenQuake engine	47
Tabela 3.4 - Tabela 3.4 - Proposta de zonamento sísmico de Angola (Fonte: autor)	48
Tabela 4.1 - População de Angola à data de 16/05/2014 Fonte: INE, 2016	52
Tabela 4.2 - Número de agregados familiares / unidades habitacionais. Fonte: INE, 2016...	54
Tabela 4.3 - Número de agregados com base no material de construção usado nas paredes – Fonte: INE, 2016	55
Tabela 4.4 - Nº de agregados com base no material de construção usado no chão/pavimentos - Fonte: INE, 2016	55
Tabela 4.5 - Tipos de construção predominantes em Angola (Fonte: autor)	59
Tabela 4.6 - Classes estrutural dos edifícios em função do sistema de resistência lateral (Fonte: autor)	61
Tabela 4.7 - Esquema para moradias para Angola, combinando o tipo de parede com o material do piso (Fonte: autor)	62
Tabela 4.8 - Esquema para moradias em Angola, considerando o tipo de parede e pavimento para cada tipo de construção (Fonte: autor)	63
Tabela 4.9 - Número médio de pisos e número de apartamentos por piso (Fonte: autor)	63
Tabela 4.10 - Área de construção de referência por moradia	64
Tabela 4.11 - Custo de reposição/reconstrução de referência por unidade de área de construção (Fonte: orçamentos de vários empreiteiros)	65
Tabela 4.12 - Custo de reposição/reconstrução por cada moradia (Fonte: autor)	65
Tabela 4.13 - Resumo do inventário de edifícios de Angola – Fonte (INE, 2016)	66
Tabela 5.1 - Evolução dos regulamentos sísmicos em Portugal – Fonte: Costa, 2008	75

Tabela 5.2 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo o espectro de resposta elástica do tipo 1 – adaptado do EC8 (CEN, 2010).....	78
Tabela 5.3 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo o espectro de resposta elástica do tipo 2 - adaptado do EC8 (CEN, 2010).....	78
Tabela 5.4 - Formulação da metodologia do índice de vulnerabilidade (Vicente, 2008).	84
Tabela 5.5 - Curvas de fragilidade das classes de edifícios. Fonte: OpenQuake https://platform.openquake.org/fragility	88
Tabela 5.6 - Modelo de dano-perda, que correlaciona cada estado de dano para rácios de perda. (Silva e Calderon, 2018).	90
Tabela 5.7 - classes de edifícios uniformizadas para determinação das curvas de vulnerabilidade - Fonte: autor.....	91
Tabela 5.8 - Número de edifícios por classes de funções de vulnerabilidade - Fonte. Autor	93
Tabela 6.1 - Principais calculadoras do OpenQuake, (Silva et al., 2013).....	99
Tabela 6.2 - Sobreposição das funções de vulnerabilidade com a perigosidade - Fonte: autor	101
Tabela 6.3 - Valores de <i>loss ratio</i> para cada função de vulnerabilidade e distribuídos pelo país – Fonte: autor	102
Tabela 6.4 - Perdas económicas, por classes de vulnerabilidade, para probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos – Fonte: autor	104

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O mundo tem conhecido um crescimento demográfico acentuado, com aumento de cerca de 83 milhões de habitantes por ano. Segundo um relatório das Organizações das Nações Unidas, publicado no ano 2019 (ONU, 2019), a população mundial atingiu um total de 7,7 bilhões, com um aumento de cerca de 1 bilhão desde o ano 2007 e 2 bilhões desde o ano 1994. Prevê-se que no ano 2030 o número da população atinja os 8,5 bilhões e 9,7 bilhões no ano 2050. Em paralelo ao crescimento populacional acentuado, verifica-se, igualmente, um aumento de ocorrência calamidades naturais, originadas por fenómenos naturais e pela acção do homem sobre a natureza, resultando em perdas humanas e económicas de grande relevo.

Angola tem registado, igualmente, um crescimento populacional considerável. No ano 2014, segundo o Relatório do Censo Populacional, a população angolana estimava-se em cerca de 25,78 milhões de habitantes (INE, 2016). Estima-se que até ao final do ano 2019 a população atinja de cerca de 30 milhões, um aumento de cerca de 4 milhões de habitantes, representando um crescimento de cerca de 15% em relação à população estimada no censo populacional (INE, 2016).

Tem-se igualmente registado a ocorrência de algumas calamidades naturais, com destaque para a questão das chuvas excessivas e fenómenos cíclicos de cheias e secas que afectam as províncias mais a Sul do país. De forma complementar, têm ocorrido eventos sísmicos em certas zonas do país, embora com magnitudes classificadas de fracas a moderadas na escala de Richter, sem o registo de perdas humanas ou danos materiais significantes. Não obstante a este facto, manifesta-se necessária a classificação do risco sísmico de edifícios residenciais do país, de forma a ter uma ideia mais elaborada sobre o fenómeno sísmico no país e permitir implementar medidas de mitigação, quer seja ligada à exposição (crescimento urbanístico) e da vulnerabilidade das estruturas (regulamentação específica).

Portanto, na busca de condições de abrigo aos fenómenos naturais, o crescimento populacional tem forçado à expansão urbana das regiões, sendo muita das vezes conduzida sem a observação das boas práticas urbanísticas e de engenharia, tornando as cidades muito vulneráveis às acções das catástrofes naturais. A título de exemplo, o sismo do Haiti, ocorrido a 12/01/2010 foi considerado um dos mais

mortíferos da história, com perdas humanas estimadas entre 100 e 200 mil habitantes (ONU, 2010) e perdas económicas incalculáveis, embora não tenha sido o evento com a magnitude mais alta na escala de Richter. Os danos causados, refletem a alta vulnerabilidade estrutural do parque edificado. Outro exemplo, o tremor de terra ocorrido no dia 24/12/2004 junto à costa oeste de Sumatra (Indonésia) que, conjuntamente com os maremotos gerados pelo sismo, provocou a morte a mais de 220.000 pessoas, em 14 países, sendo considerado o evento mais devastador do século XXI (Lourenço et al., 2019).

Neste sentido, é importante que sejam efetuados estudos sobre o risco sísmico das regiões e, consequentemente, adotar medidas para a mitigação em função dos níveis de risco determinados em escalas municipal, provincial, nacional ou mesmo regionais.

Os sismos são considerados um dos mais devastadores desastres naturais pelas altas perdas humanas e económicas causadas. Em média, por ano, tem causado cerca de 10.000 mortes e perdas económicas estimadas em bilhões de dólares (ex: Northridge, California, 17/01/1994 – USD30 biliões e 60 mortes; Hyogo-ken Nanbu, Japão, 17/01/1995 – USD150 biliões e 6.000 mortes), (Elshanai & Di Sarno, 2008).

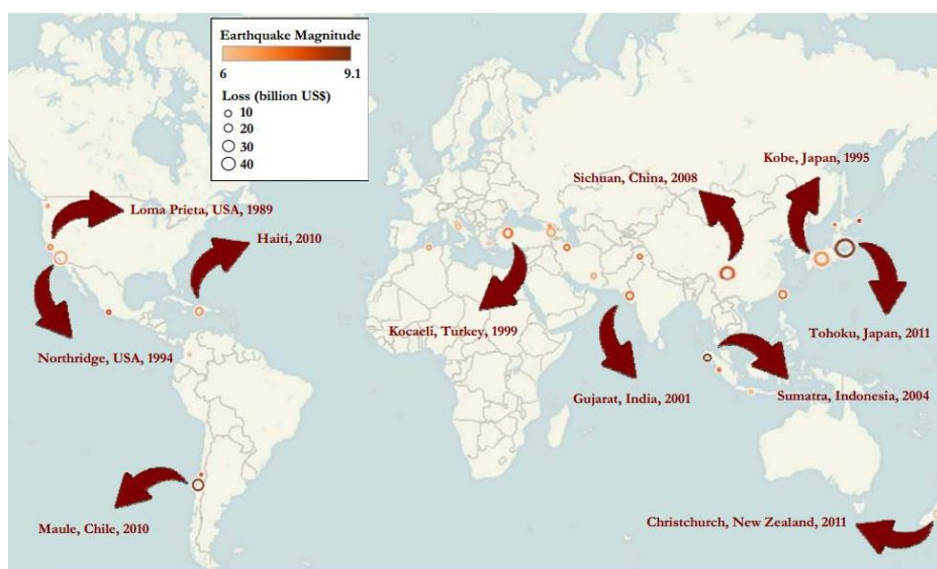


Figura 1.1 - Perdas económicas de eventos sísmicos relevantes (Romão, 2012)

O trabalho a ser desenvolvido nesta dissertação trará considerações sobre a avaliação do risco sísmico de edifícios residenciais no território angolano.

1.2. ACTIVIDADES SÍSMICA

1.2.1. CONCEITOS GERAIS

Como já referido, os eventos sísmicos têm causado perdas humanas e económicas ao longo dos tempos, devido ao colapso total ou parcial das estruturas. Vários eventos sísmicos com magnitudes têm ocorrido diariamente em todo mundo. Os efeitos dos eventos com magnitudes inferiores a 2,0 na escala de Richter

não chegam a ser sentidos pelas pessoas, ao passo que os com 4,5 os efeitos são sentidos pelas pessoas, mas geralmente insuficientes para causar danos às estruturas. Os eventos com grandes magnitudes acontecem com pouca frequência (i.e. em média 1 vez por ano) e podem ser considerados como responsáveis pelos maiores danos e perdas que se têm registado (Linderburg & McMullin, 2008).

A magnitude, M , geralmente expressa na escala de Richter, é o parâmetro que indica a quantidade de energia libertada numa acção sísmica, e pode ser determinada conforme a Eq. (1), abaixo:

$$M = \log_{10} \cdot \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (1.1)$$

onde M é a magnitude, A é a máxima amplitude no sismógrafo, conforme Figura 1.2 e A_0 é a amplitude de referência, normalmente tida como $A_0 = 0.001\text{mm}$.

Segundo (Linderburg & McMullin, 2008), a relação entre a energia libertada por um sismo e a sua magnitude é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta E_L = (10^{\Delta M})^{\frac{3}{2}} \quad (1.2)$$

onde ΔE_L representa o aumento na energia libertada pelo sismo e ΔM o aumento na magnitude do sismo na escala de Richter. A expressão indica que um acréscimo unitário na magnitude do terremoto corresponde a um aumento de aproximadamente trinta e duas vezes na energia libertada.

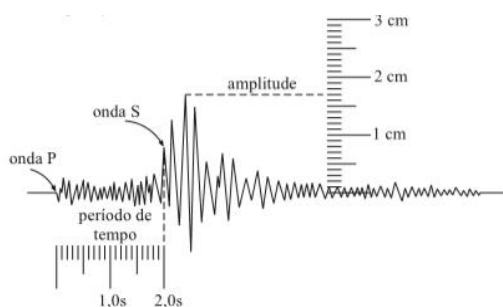


Figura 1.2 - Leitura de amplitude em sismógrafo (Adaptada de Lindeburg e McMullin, 2008)

A quantidade de energia libertada (E_L) é maior do que a energia radiada (E_R) no terremoto devido à perda de energia por geração de calor e outros efeitos (Miranda, 2013). Portanto, foi apresentada uma relação aproximada entre a energia radiada, expressa em *ergs*, e a magnitude do sismo determinada por (Gutenberg & Richter, 1956) e (Linderburg & McMullin, 2008), conforme Eq. (3):

$$\log_{10} E_R = 11,8 + 1,5 \cdot M \quad (1.3)$$

Um outro conceito que está directamente ligado à probabilidade de um evento causar danos em maior ou menor escala, independentemente da magnitude é considerado como intensidade sísmica. Existem várias escalas de intensidade, dentre as quais se podem destacar as escalas Mercalli Modificada, EMS98 e MSK. A título de exemplo, a escala Mercalli Modificada apresenta 12 níveis que variam de I à XII e expressam os efeitos observados em função da intensidade, sendo a mais baixa definida como “Nenhum movimento é percebido, apenas registado pelos aparelhos de precisão ou sismógrafos” ao passo que o maior valor indica “Destruição total e Modificação da topografia” (Linderburg & McMullin, 2008).

Para além dos parâmetros como a magnitude e intensidade, existem outras abordagens para a caracterização de um sismo. Refere-se ao parâmetro da aceleração de pico do solo ou PGA, *Peak Ground Acceleration*, cujos valores são determinados através de sismógrafo e é geralmente considerada como uma percentagem da aceleração de gravidade g . É um dos elementos fundamentais, muito usado, para a consideração da acção sísmica no cálculo de estruturas. (Gutenberg & Richter, 1956) e (Linderburg & McMullin, 2008) apresentam expressões matemáticas que relacionam o valor do PGA no epicentro à magnitude M , conforme Eq (4) e (5):

$$PGA = \frac{y_0}{1 + \left(\frac{R'}{h}\right)^2} \quad (1.4)$$

$$\log_{y_0} = -(b + 3) + 0,81M - 0,27M^2 \quad (1.5)$$

onde, R' é a distância entre o ponto de medição da aceleração e o epicentro em quilómetros, h é a profundidade em quilómetros e b é um factor específico do solo.

O risco pode ser definido como sendo a probabilidade de ocorrência de um determinado perigo a um dado nível que causa perdas ou danos a um certo nível. Assim, o risco sísmico pode ser considerado um parâmetro que indica um potencial de perdas e danos, causados pela ocorrência de um determinado evento sísmico (Vicente, 2008).

A avaliação do risco sísmico de um determinado local faz-se confluindo 3 factores principais: o modelo probabilístico de perigosidade sísmica, um conjunto de funções capazes de descrever a percentagem de perdas de a uma determinada intensidade do evento sísmico e do modelo de exposição que indica a distribuição espacial dos elementos (edifícios e infraestruturas) expostos à referida perigosidade sísmica (Silva *et al.*, 2013).

A avaliação do risco sísmico de uma região é importante na medida em que permite determinar a capacidade de resposta, em termos estruturais, do parque edificado da região e, por sua vez, a quantificação estimada das potenciais perdas e danos a serem causados em função do grau de intensidade da acção sísmica. Tal conhecimento, permite adoptar medidas de mitigação dos principais factores dos quais o risco sísmico depende, tais como: (i) a redução da vulnerabilidade, adoptando medidas de engenharia estrutural mais exigentes face a acção sísmica; (ii) o melhor conhecimento sobre a perigosidade sísmica da região, permitindo desta forma a consideração do nível de segurança estrutural do parque edificado ou a edificar na região; e (iii) conhecimento do grau de ocupação dos solos,

possibilitando a melhoria ou a concepção de planos urbanísticos, considerando, também, os critérios para melhor redução de danos face as acções sísmicas. Normalmente, as medidas de mitigação da exposição são definidas pelas equipas de acompanhamento e ou concepção do planeamento urbano das cidades, que levam, muitas das vezes, a mudança da localização das infraestruturas já existentes para outras localidades cujo grau de exposição leva a um risco sísmico mais baixo.

Segundo o Eurocódigo 8 (CEN, 2004), o risco sísmico é, no geral, considerado como a convolução da perigosidade sísmica (*seismic hazard*), exposição e vulnerabilidade. Para melhor compreensão, apresentam-se os conceitos abaixo:

Perigosidade sísmica:

Existem vários conceitos sobre perigosidade sísmica. Em termos numéricos pode ser definida como sendo uma medida do potencial de perigo relacionado com fenómenos sísmicos, nomeadamente as vibrações sísmicas, as roturas do terreno e fenómenos de liquefação dos solos. Pode ainda ser definida como sendo a característica de um sismo relacionada com a capacidade de causar danos e perdas (Wang, 2011).

Vulnerabilidade sísmica de estruturas:

Pode ser entendido como parâmetro associado à suscetibilidade das estruturas aos efeitos dos sismos, que pode resultar em danos, causados pelos movimentos na base impostos pela acção do sismo (Calvi et al., 2006). É, regra geral, definida com base no grau de danos que podem resultar em função do nível da acção sísmica. Esta é a componente do risco sísmico que pode ser controlada pela engenharia de projectos, através de um conjunto de normas técnicas, como por exemplo o Eurocódigo 8 (CEN, 2010).

Exposição:

Refere-se às pessoas, edificações, infraestruturas, instalações comerciais e industriais localizadas nas áreas onde os sismos podem ser sentidos, causando um certo nível de perdas humanas e materiais. Em suma, trata-se do valor económico e humano dos elementos expostos à acção sísmica.

1.2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / ESTUDOS ANTERIORES

Os terremotos e a sismologia têm uma história interessante pelo facto dos eventos afectar tudo que existe a nossa volta. Os estudos sobre terremotos foram iniciados por grandes nomes da ciência, dentre os quais destacam-se Platão, Aristóteles, Da Vinci e Kant. A consideração do termo risco no estudo dos terremotos foi inicialmente proposta por cientistas como Pascal, Fermat, Bernoulli, Keynes, etc (Scawthorn, 2006). Entretanto, alguns autores (Housner, 1984, Usami, 1988, Hudson, 1992) referem ser difícil precisar as datas do início do estudo da engenharia sísmica, abarcando largamente o risco sísmico numa perspectiva moderna (Borzognia & Bertero, 2015).

O risco sísmico é considerado um tema do século 20, tendo os grandes estudos iniciado na década de 80, devido aos crescentes danos causados pelos tremores de terras e desastres relacionados tais como os tsunamis. Os sismos ocorridos na Europa, com destaque os da Roménia (1977) e Ex-Yugoslávia (1979), incentivaram o desenvolvimento de vários estudos e projectos sobre a avaliação e mitigação de riscos sísmicos pelas grandes perdas causadas (Vicente, 2008).

Várias organizações ao nível do mundo têm desenvolvido estudos sobre a avaliação e métodos para a mitigação de riscos sísmicos. Refere-se, por exemplo, uma das maiores iniciativas de escala global no período compreendido entre os anos 1992 a 1999, do *Global Seismic Hazard Assessment Program* (GSHAP), que serve de plataforma de informação sobre a perigosidade sísmica à disposição das várias agências de monitoramento de sismos de escala internacional, regionais e locais, de acordo com as suas necessidades (Giardini, 1999). Existem outras plataformas que providenciam informações sobre a acção sísmica de várias regiões do mundo, tais como o *Global Earthquake Model* (GEM) e a *United States Geological Survey* (USGS).

No ano 2009 o GEM iniciou um projecto piloto para o desenvolvimento de infraestruturas de IT do GEM, denominado GEM1. O projecto teve como principal objectivo a criação de um *software* que permite a avaliação do risco sísmico à escala nacional, regional ou internacional, denominado *OpenQuake* (Silva, et al., 2013). Tem sido usado por vários especialistas do mundo para a determinação da perigosidade e risco sísmico, como por exemplo, a “*Seismic risk assessment for mainland Portugal*” (Silva et al., 2014), “*Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica*” (Calderon, & Silva, 2018);

Recentemente, foi disponibilizado pelo GEM o Modelo Sísmico de África como parte do Modelo Sísmico Global. Para o efeito, o GEM combinou quatro modelos regionais de perigosidade sísmica, nomeadamente da África Subsaariana, Norte de África, África Oriental e Sul de África, envolvendo especialistas de cada região (Figura 1.4). Por sua vez, o modelo de risco sísmico combinou a perigosidade sísmica e a exposição das edificações e a vulnerabilidade estrutural das edificações, resultando num modelo de risco baseado em critérios probabilísticos. É considerada, até à data, a maior plataforma com informações sobre riscos sísmicos do continente. O modelo cobre 52 países e 2 territórios e aponta, para África, uma perigosidade sísmica classificada de baixa à moderada, com maior concentração de perigosidade sísmica no Norte de África, dada a convergência entre as placas tectónicas Nubia e da Eurásia e no Leste de África, considerando a actividade sísmica do sistema de fendas da África Oriental (GEM, 2019).

Relativamente à Angola, os estudos sobre a sismicidade tiveram início no ano 1945, com o registo dos eventos ocorridos até à época, a partir dos quais foi possível desenhar o primeiro mapa (Figura 2.8) com a proposta das principais zonas sísmicas do país (Moreira, 1968). Mais adiante, (Neto, 2014) desenvolveu um estudo sobre a sismicidade natural e desencadeada pela infraestrutura da barragem de Capanda, localizada na província de Malange, tendo apresentado um mapa com a localização dos epicentros dos eventos sísmicos naturais e desencadeados no país desde o período de 1945 e o ano 2014. (Figura 2.9).

Segundo a informação disponibilizada pelo GEM (GEM, 2019), a perigosidade sísmica em Angola pode ser classificada de fraca a moderada (Figura 1.3), com acelerações de pico do solo para a probabilidade

de excedência de 10% em 50 anos (período de retorno de 475 anos) que variam de 0.05 à 0.08g, para a zona litoral-centro, compreendendo as províncias de Benguela, Huíla e Cuanza-sul e 0.08 à 0.11g no extremo oposto, correspondente à província do Moxico, dada a proximidade com o Este de África, que tem actividade sísmica significativa.

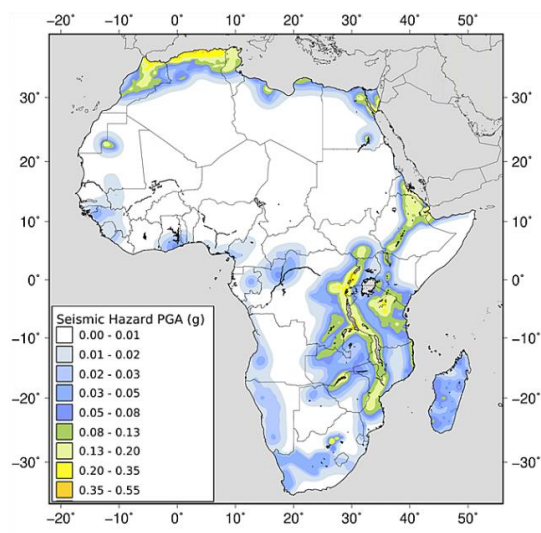


Figura 1.3 - Mapa de perigosidade sísmica de África. Fonte: GEM, retirada aos 02/08/2019

<https://hazard.openquake.org/gem/models/WAF/>

O risco sísmico, por sua vez, apresenta-se quase como inexistente (Figura 1.4), pelo facto de não existir informações suficientes não só das funções de vulnerabilidade estrutural e respectivos níveis de perdas associadas como também da distribuição espacial e geográfica dos edifícios e infraestruturas do parque edificado de Angola.

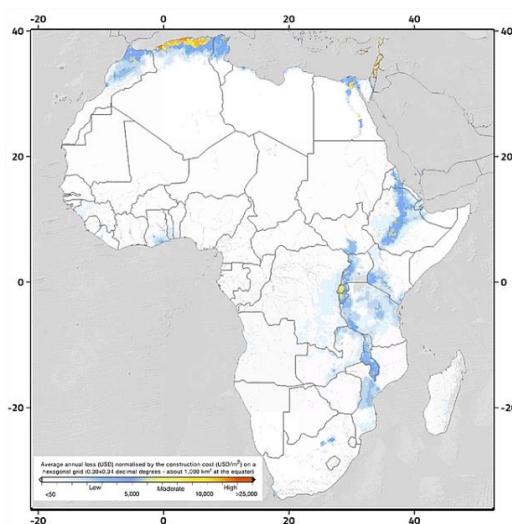


Figura 1.4 - Mapa de risco sísmico de África (GEM, retirada aos 02/08/2019,

<https://maps.openquake.org/map/global-seismic-risk-map/#5/-10.393/14.054>)

Dada a inexistência de estudos sobre o risco sísmico de Angola, com o presente trabalho, pretende-se levar ao conhecimento da classe académica e profissional uma abordagem científica sobre o risco sísmico de edifícios residenciais em Angola, percorrendo sobre os modelos de perigosidade, obtido da plataforma desenvolvida pelo GEM, a identificação dos principais tipos de edificações existentes em Angola e suas respectivas classes estruturais mais representativas, a determinação do número aproximado de edifícios e a escolha das funções de vulnerabilidade disponíveis na base de dados do GEM, desenvolvidas para a África.

1.3. EFEITOS DOS SISMOS NAS ESTRUTURAS

As acções sísmicas provocam danos às estruturas (betão armado e pré-esforçado, metálicas, materiais compósitos) de pontes, edifícios, viadutos, etc. A severidade dos referidos danos depende do grau de vulnerabilidade sísmica das estruturas, tendo o grau de consideração dos pressupostos sismo-resistentes e da qualidade dos materiais de construção utilizados.

No caso de estruturas de betão armado, (Rodrigues, 2006), os danos e colapsos das estruturas são causados, por factores, dentre os quais destacam-se os seguintes: (i) quantidade insuficiente de estribos; (ii) fraca ou baixa resistência dos nós de ligação; (iii) fraca capacidade de resistência ao corte e à flexão; (iv) não consideração dos elementos de alvenaria no dimensionamento sismo-resistente; (v) mecanismos do tipo viga forte-pilar fraco; (vi) mudanças abruptas de rigidez dos pisos; (vii) mudança de características geométricas e de rigidez ao longo da altura; (viii) irregularidades em planta, tais como o afastamento considerável do centro de rigidez do centro de massa do edifício; e (ix) deficiências estruturas por imposição da arquitectura.

Para além da questão da vulnerabilidade estrutural, a aceleração do solo, durante um abalo sísmico, é factor preponderante na determinação do grau de danos a causar nas edificações. A geologia e topografia locais influenciam o percurso e amplificação das ondas sísmicas, determinantes para o nível de danos a causar na estrutura. Por exemplo, o sismo de Alaska, 1964 foi induzido por falhas do terreno, tendo causado perdas estimadas em mais de 2.000 milhões USD (Elnashai & Di Sarno, 2008).

Portanto, para um determinado nível de aceleração do solo podemos ter variados níveis de danos às estruturas. Tal facto deve-se ao grau de acentuação de irregularidades estruturais dos edifícios. Segundo (Lindenburg & McMullin, 2008), as estruturas podem ser classificadas em regulares e irregulares, fundamentadas pelas características geométricas. As primeiras referem-se a estruturas com um índice de descontinuidades físicas, uniformidade na distribuição das massas, resistência, ductilidade e rigidez. Por outro, existem irregularidades em planta e em altura. As primeiras referem-se às várias situações de distribuição dos elementos estruturais, que podem originar grandes excentricidades entre o centro de massa e de rigidez, ao passo que as irregularidades em altura se referem às várias descontinuidades quer sejam dos elementos estruturais como dos não estruturais, podendo originar diferenças na rigidezes e massas dos pisos, mecanismos de pilares curtos, mecanismos de piso fraco (*soft-storey*), etc.

Os principais danos causados em estruturas de betão armado, aço e materiais compósitos podem ser apresentados na (Tabela 1.1), identificando o elemento/sistema estrutural e o correspondente tipo de dano causado em função da acção sísmica (Elnashai & Di Sarno, 2008).

As irregularidades estruturais podem causar danos severos às estruturas, por intermédio de vários mecanismos quer em termos de rigidez, massas, ao nível dos nós de ligação, pilares curtos, pisos fracos, diferenças de rigidezes ao nível da altura do edifício, ligação entre dois edifícios independentes, etc. Nas imagens das figuras 1.5 a 1.11 são ilustrados alguns casos mais correntes de danos causados pelos mecanismos referidos.

Os princípios básicos para a diminuição da vulnerabilidade das estruturas face às acções sísmicas devem ser considerados na fase de concepção arquitectónica dos edifícios, de forma a reduzir ou eliminar as causas de danos provocados por elementos estruturais e não estruturais. (Elnashai & Di Sarno, 2008), (Lindenburg e McMullin, 2008) e o EC8 (CEN, 2010) apresentam alguns dos princípios fundamentais para redução das irregularidades, nomeadamente: (i) simplicidade estrutural, caracterizada pela a existência de trajetórias claras e objectivas das forças sísmicas, que por sua vez, facilita a análise sísmica e reduz, consideravelmente, as incertezas associadas; (ii) uniformidade, simetria e redundância da estrutura, caracterizada pela distribuição regular dos elementos estruturais tanto em planta como em altura; (iii) resistência e rigidez nas duas direcções, de maneira a permitir o edifício resistir às acções sísmicas nas direcções ortogonais; (iv) resistência à rigidez e à torção, para limitar os movimentos devidos à torção que tendem a solicitar de forma não uniforme os diferentes elementos estruturais; (v) acção de diafragma ao nível dos pisos, permitindo que os pavimentos dos edifícios actuem como diafragmas que recebem e transmitem as forças de inércia aos sistemas estruturais verticais e garantem a solidariedade destes sistemas na resistência à acção sísmica horizontal; e (vi) fundação adequada, para garantir a correcta ligação a superestrutura e assegurar uma excitação sísmica uniforme em todo o edifício.

Tabela 1.1- Danos comuns à estruturas causadas por acções sísmicas. Fonte: Adaptado de Elnashai, (2008)

Estruturas de alvenaria e betão armado		Estruturas de aço e materiais compósitos	
Elemento estrutural/sistema	Dano Observado	Elemento estrutural/sistema	Dano Observado
Vigas	Falha ao corte, queda do recobrimento, encurvadura da armadura	Vigas	Fadiga das almas e banzos, encurvadura local e mecanismo de rotura frágil.
Pilares	Fissuração, queda do recobrimento, esmagamento, encurvadura da armadura colapso para fora do plano, falha ao corte e à flexão, efeito de pilar-curto.	Pilares	Fadiga dos banzos, encurvadura local, fractura frágil, falhas nas emendas, encurvadura do elemento
Ligações	Fissuração, esmagamento, encurvadura da armadura e colapso para fora do plano, falha ao corte	Contraventamento	Encurvadura local e completa do membro, rotura frágil
Paredes estruturais e de enchimento	Fendas em forma de X, esmagamento, encurvadura da armadura, <i>overtuning</i> , <i>rocking</i> e deslizamento	Ligações	Fadiga, encurvadura local, fractura frágil, fissuras nos cordões de soldadura, deformações excessivas do panel, ruptura do parafuso
Fundações	Assentamentos, <i>pull-out</i> da armadura, <i>rocking</i> , deslizamento, <i>uplifting</i>	Fundações	Ruptura da ancoragem do parafuso, fissuras nos cordões de soldadura, <i>pull-out</i> , deformações excessivas das chapas de ligações
Pórticos	Pisos fracos, deformação residual excessiva, distress dos diafragmas (lajes) e conexões, interação entre edifícios, <i>rocking</i> , <i>uplifting</i> , queda dos parapeitos e quebra das chaminés.	Pórticos	Pisos fracos, deformação residual excessiva, descompressão dos diafragmas (lajes) e conexões, interação entre edifícios, <i>uplifting</i>



Figura 1.5 - Caso de colocação de elementos a ligar duas estruturas (à esquerda) e altura diferentes entre pisos e elementos não estruturais (à direita). Localização: Kobe - Japão, 1995



Figura 1.6 Casos de danos causados por pilares curtos



Figura 1.7 - Caso de variação dos elementos em altura (diferenças de altura entre pisos e ausência de elementos não estruturais)

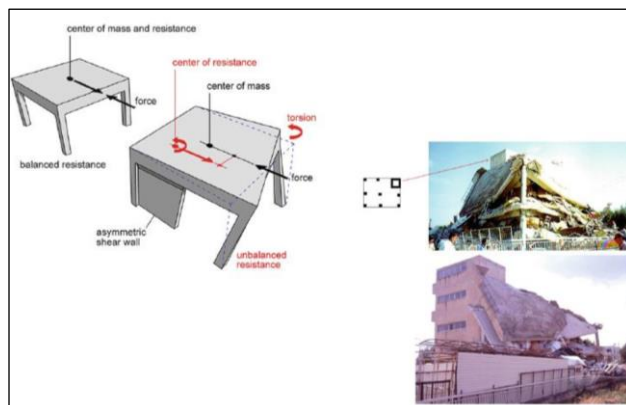


Figura 1.8 - Caso de variação dos elementos em altura (diferenças de altura entre pisos e ausência de elementos não estruturais)



Figura 1.9 - Exemplo de fraca resistência ao corte do nó de ligação – sismo de Petino

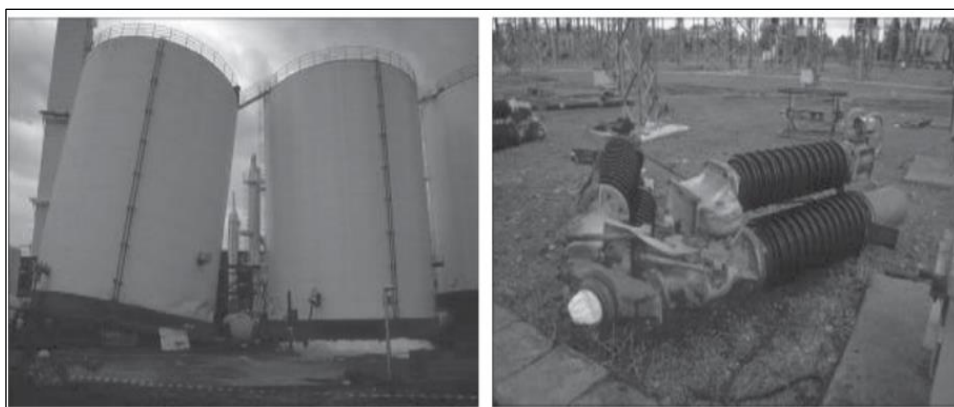


Figura 1.10 - Inclinação de tanques de oxigênio (esquerda) e fractura frágil do *Circuit breaker* (direita) no sismo de 1999 Turquia – (Elnashai & Di Sarno, 2008)



Figura 1.11 - Danos em elementos não estruturais, causados, eventualmente, por fracos apoios, má ligação com os elementos estruturais, falta de amarrações, etc - L'Áquila, Itália, 2009.

1.4. MOTIVAÇÃO

A estabilidade das estruturas é calculada, entre outras, para as acções resultantes das cargas verticais, relacionadas com os pesos volúmicos dos materiais, neve, sobrecargas de utilização, e acções horizontais tais como ventos e sismos.

No cálculo das estruturas do parque edificado de Angola, salvo exceções, têm sido consideradas apenas as acções verticais e o vento como acção horizontal. Tal facto leva a não consideração dos requisitos básicos para garantia de um bom comportamento das estruturas face as acções sísmicas, potenciando, desta forma, a existência de perdas consideráveis, em caso da ocorrência de um evento sísmico.

Igualmente, segundo dados sobre a perigosidade sísmica, Angola é considerado um país de baixa perigosidade sísmica, dado os seus baixos valores da aceleração do solo. Entretanto, o não conhecimento sobre a exposição de edifícios e suas respectivas funções de vulnerabilidade estrutural expostos a acção sísmica, pode, eventualmente, levar a perdas económicas consideráveis, em função dos rácios de perdas e quantidade de edifícios expostos a certos graus de perigosidade. É, por isso, necessária a realização de uma abordagem inicial sobre os principais modelos (perigosidade, vulnerabilidade e exposição) que servem de base para a determinação do risco sísmico do país.

1.5. OBJECTIVOS

O presente trabalho tem como principal objectivo a avaliação do risco sísmico de Angola, de forma a permitir o conhecimento sobre as potenciais perdas humanas e económicas em função da aceleração das ondas sísmicas em caso de ocorrência de sismos numa dada região do país. Por sua vez, com a matriz de risco sísmico dos edifícios residenciais, definir e implementar um conjunto de medidas para mitigação dos efeitos de um determinado evento sísmico, que compreende, entre outras, a redução da vulnerabilidade do parque edificado, com a elaboração de regulamentação adaptada às condições sísmicas de Angola e o possível reforço das estruturas existentes mais vulneráveis.

1.6. METODOLOGIA

A avaliação sísmica, como já referido, é o resultado da convolução dos modelos de perigosidade sísmica, vulnerabilidade sísmica e exposição sísmica. A insuficiente informação prévia sobre a história da sismicidade, de um estudo profundo sobre as tipologias e classes estruturais do edificado de Angola, entre outros aspectos, levaram a que fosse adoptada a seguinte metodologia:

Inicialmente, foi obtida, através da plataforma da *Global Earthquake Model* - GEM (GEM, 2019), o mapa das acelerações de pico do solo, para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (período de retorno de 475 anos). A referida informação foi tratada, tendo sido considerados os valores mais altos à escala provincial, resultando num mapa da perigosidade sísmica. Com base em informações sobre as unidades geológicas e de solos de Angola, foi obtida a informação sobre a velocidade de corte do solo a uma profundidade de 30m (V_{s30}), parâmetro que indica os efeitos dos solos nas acelerações da acção sísmica, recorrendo às categorias de unidades geológicas e de solos propostas por (Willis & Clahan, 2006) e (Stewart *et al.*, 2008). Com a referida informação, apresentou-se uma proposta inicial sobre as principais zonas sísmicas, com base nas acelerações, que podem servir de base para estudos futuros.

O modelo de exposição foi elaborado, considerando a informação de base constante do relatório do censo populacional de Angola, realizado no ano 2014 e publicado no ano 2016 (INE, 2016). A informação permitiu a identificação do número de fogos habitacionais, classificados em função dos principais materiais de construção para os pavimentos, coberturas e paredes. Identificaram-se as principais tipologias de edificações existentes em Angola com base nos sistemas de resistência lateral. Seguiu-se a definição das classes estruturais dos edifícios, recorrendo à taxonomia disponível da base de dados do GEM <https://platform.openquake.org/taxtweb/>, (Brzev *et al.*, 2013) e nas principais tipologias existentes na América do Sul, apresentada por especialistas no desenvolvimento do modelo de exposição da região andina, composta por 7 países: Argentina, Bolívia, Chile, Colômbia, Equador, Peru e Venezuela, dada algumas semelhanças das características construtivas das tipologias habitacionais (Yepes *et al.*, 2016). De seguida, a partir do número de moradias, foram definidos os seus tipos (casas/cabanas, apartamentos, anexos ou compartimentos desagregados e casas improvisadas). Em várias opções, foram feitas combinações dos sistemas de resistência lateral com os principais de moradias referidas. Posteriormente foram definidos os números de pisos e quantidade de apartamentos/moradias por pisos para as classes previamente definidas. Com base nesta informação, foi possível determinar o número de edifícios residenciais que compreende o parque edificado de Angola e a sua distribuição por todas as províncias do país. Apresentados os custos de construção praticados em Angola, em função dos níveis de qualidade, para as áreas urbanas e rurais, foi determinado o valor necessário para a reconstrução (custo de reconstrução) em caso de destruição. Estes custos foram apresentados por províncias e para as principais classes de estruturas do parque edificado. O modelo de exposição, em suma, apresenta não só a quantidade de elementos/edifícios distribuídos geograficamente e expostos à perigosidade sísmica que caracteriza o país inteiro como também o seu respectivo valor económico.

Portanto, conhecido o número de edifícios e seu correspondente valor económico, seguiu-se a definição das funções de vulnerabilidade, que compreendem a informação sobre os níveis/rácios de perdas para diferentes níveis de intensidade sísmica. Não existem estudos prévios sobre funções de vulnerabilidade

das classes estruturais do parque edificado de Angola. Neste sentido, foi decidido realizar este estudo com base em levantamentos minuciosos sobre os principais tipos de edifícios no país. Portanto, para efeitos do presente estudo, as curvas de fragilidade e vulnerabilidade foram extraídas da base de dados do GEM, (<https://platform.openquake.org/vulnerability>) cujas curvas foram determinadas para a tipologia de construções predominantes para África Oriental e Subsaariana. Por fim, realizou-se a sobreposição das curvas de vulnerabilidade com o modelo de perigosidade, cruzando a informação das acelerações de pico do solo, para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos, considerando, igualmente, os efeitos dos solos, com as curvas de vulnerabilidade e aferir a distribuição de edifícios com base nas curvas de vulnerabilidade e os potenciais níveis de danos e perdas económicas esperadas para o respectivo período de retorno.

Por fim, determinados os modelos atrás referidos, seguiu-se o cálculo do risco sísmico do país, considerando apenas as perdas económicas esperadas para o período de retorno de 475 anos. Para o efeito, foram determinados os rácios de perdas (*loss ratio*) em função da perigosidade de cada local/província. As principais curvas de vulnerabilidade para as tipologias determinadas estão expressas em acelerações espectrais. Portanto, foi necessária a conversão para acelerações de pico do solo (PGA), considerando o factor de conversão, conforme a forma do espectro de resposta elástica, constante no EC8 (CEN, 2010). Determinados os rácios, em função da distribuição dos edifícios, foram estimadas as perdas económicas para cada classe de vulnerabilidade, multiplicando o valor económico dado pelo custo de reposição dos edifícios classificados em função das curvas de vulnerabilidade pela percentagem do rácio de perda. Com isso, foram determinadas as perdas por províncias e por classe de vulnerabilidade.

1.7. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por 7 capítulos.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento sobre o tema e apresentados vários conceitos e definições relativas ao risco sísmico, introduzindo os principais modelos a determinar para a determinação do risco sísmico do país. Neste capítulo é apresentado o estado da arte, com a revisão bibliográfica dos principais estudos sobre risco sísmico desenvolvidos até então. A motivação, objectivos e metodologia são igualmente pontos apresentados no presente capítulo.

No segundo capítulo faz-se uma incursão ao enquadramento geográfico e geológico de Angola e uma viagem à sismicidade histórica de Angola, aferindo quais os eventos sísmicos ocorridos, suas magnitudes, danos físicos e humanos causados. Com base na informação, foi apresentada umas das primeiras propostas das zonas sísmicas de Angola (Moreira, 1968) e outro estudo, recentemente, desenvolvido sobre a sismicidade natural e desencadeada pela barragem de Capanda (Neto, 2014).

No terceiro capítulo, com base nas informações prévias e gerada da plataforma *OpenQuake Engine* (GEM, 2018), para o território angolano, foi efectuado o tratamento dos dados das acelerações de pico do solo (PGA), tendo resultado no mapa de acelerações de Angola, contendo os valores mais altos e considerando os efeitos dos solos com base no indicador V_{s30} . Por fim, com base no mapa geral, foi

apresentada uma proposta inicial de zoneamento sísmico de Angola, dado que pode ser considerado em estudos futuros quer seja na criação de regulamentação sísmica adequada para o território angolano quer em estudos diversos que exija o conhecimento sobre zonas sísmicas do país.

No quarto capítulo apresentou-se o modelo de exposição, identificando os principais tipos de edifícios predominantes no país, a classificação estrutural dos referidos tipos de edifícios e com apoio da informação sobre o número de agregados familiares classificadas por tipos de materiais na cobertura, pavimentos e paredes, retiradas do censo populacional, calculou-se o número de edifícios com base na proposta apresentada para os países da região andina da América do sul (Yepes, 2016). Por fim, apresentou-se a sobreposição do modelo de exposição com o de perigosidade.

No quinto capítulo foi desenvolvido o modelo de vulnerabilidade das estruturas, para determinar as principais curvas de fragilidade e funções de vulnerabilidade estrutural. Fez-se a distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade e distribuição por províncias. Neste capítulo, fez-se ainda uma incursão sobre as práticas de projectos em Angola e a principal regulamentação considerada para o cálculo de estruturas em especial aquela para o dimensionamento sísmico de projectos implantados no país.

No sexto capítulo foi, finalmente, gerado o mapa de risco sísmico, com base nos rácios de perdas (loss ratio) em função das curvas de vulnerabilidade. A avaliação do risco é expressa através de perdas económicas esperadas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos. Os valores foram igualmente desagregados por províncias e por classes de vulnerabilidade do parque edificado exposto à perigosidade sísmica.

Por fim, no último capítulo foram apresentadas as principais conclusões e propostas de acções futuras em volta do tema.

HISTÓRIA DA SISMICIDADE DE ANGOLA

2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

Angola está localizada na Costa Ocidental de África, abaixo da linha do equador. Faz fronteira, a Norte com a República Democrática do Congo, a Sul com a Namíbia, a Este com a Zâmbia e a Oeste com o Oceano Atlântico, tendo as seguintes coordenadas geográficas (12° 30' S, 18° 30' E). Tem uma área total de 1.246.700 Km², com uma costa atlântica de 1.650 Km de extensão, sendo o sétimo maior país de África em termos de área. Política e administrativamente, Angola é dividida por 18 províncias, 162 municípios e 559 comunas, tendo como capital a província de Luanda (Figura 2.1).O clima de Angola é caracterizado por duas estações, a chuvosa, no período que se estende de Outubro à Abril, com temperaturas mais altas, e a de Cacimbo, no período de Maio à Setembro, mais seca e com temperaturas mais baixas.

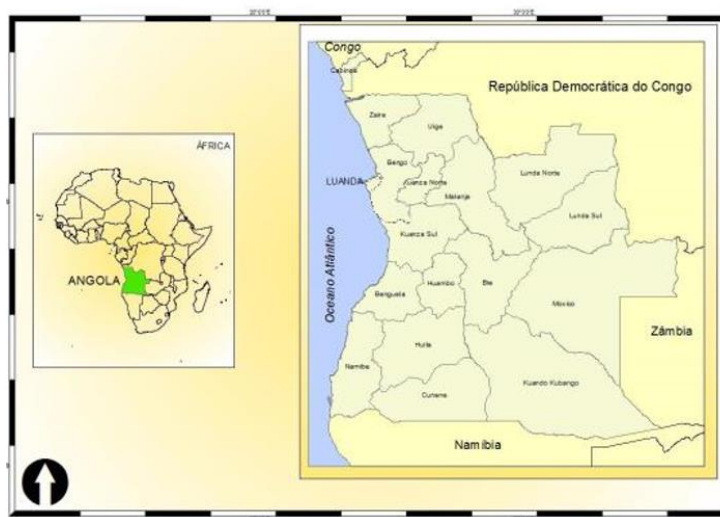


Figura 2.1 - Mapa político e administrativo de Angola (Fonte: Adaptado de BONDO, 2014)

2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E GEOLÓGICA

A geomorfologia do território de Angola distribui-se por sete unidades e oito subunidades (Figura 2.2), agrupadas com base nas formas de relevo, bacias hidrográficas, a litologia, o clima, a tectónica, os solos e a vegetação, (Marques, 1977), (Costa *et al.*, 1968) e (Silva, 2005). São consideradas as seguintes unidades e subunidades:

I - Planalto Antigo – localizada na zona do planalto central, compreende uma extensa superfície que abarca as áreas das províncias do Bié, Huambo e em estreita faixa até ao Lubango e que se estende até perto do rio Cunene.

II - Cadeia Marginal de Montanhas: caracterizada por relevos com desníveis muito acentuados, fruto da movimentação da flexura do flanco atlântico. A referida unidade ocorre na região sudeste do município da Gabela, ou seja, zonas de transição entre a província do Kuanza-sul e a do Huambo (Oeste do Huambo) e um pouco a nordeste da cidade do Lubango, província da Huíla.

III - Zona de Transição: caracteriza-se pela larga faixa paralela ao Oceano Atlântico, compreendendo as províncias de Cabinda, S. Salvador, Uíge, N´Dalatando, oeste de Lubango, até ao rio Cunene. Esta unidade ter-se-á modelado a partir da superfície do Terciário médio, resultado do rejogo da flexura continental e, provavelmente, das grandes oscilações climáticas.

IV - Orla Meridional da Bacia do Congo: compreende a região da bacia hidrográfica do rio Congo ou Zaire (rios Cuango, Cassai e outros), cobrindo parte da bacia hidrográfica do médio e alto rio Cuanza. Situa-se a leste de Uíge, em Malange, Saurino e a leste do Bié. Esta, subdivide-se em três subunidades:

IVa - Depressão de Cassange: corresponde a um antigo *graben*, sendo um meio instável onde a morfogénese predomina sobre a pedogénese;

IVb - Depressão de Cuanza-Luando: corresponde a uma antiga zona de drenagem para o Oceano Atlântico. É um meio de certo modo mais favorável à pedogénese;

IVc - Depressão do Cassai: corresponde à região da Lunda drenada para norte, em que certos rios foram sujeitos aos efeitos de basculamento em direcção à Bacia do Congo. É actualmente um meio estabilizado onde a pedogénese se sobrepõe à morfogénese;

V - Orla Setentrional da Bacia do Calaári: ocorre na zona do Namibe, tendo a evolução do relevo condicionado pela bacia do Namibe. A sua drenagem processa-se pelos rios Cunene, Cubango e Cuito. Subdivide-se pelas três subunidades seguintes:

Va - Depressão Endorreica do Cuvelai-Lueque: é uma região residual da aplanagem do Terciário médio, coberta por espessos depósitos arenosos eólicos. Admite-se que se encontre estabilizada. Por tal razão o equilíbrio pedogénese/morfogénese;

Vb - Bacia do Cubango: semelhante à anterior encontra-se estabilizada há mais tempo, favorecendo a pedogénese;

Vc - Depressão do Cunene: área depressionária condicionada pela captura para o Oceano Atlântico no Quaternário antigo. Parece identificar-se com IVb nalguns aspectos;

VI - Bacia do Zambeze: toda a região relacionada com esta unidade é drenada pelo rio Zambeze e seus afluentes Lungué-Pungo e Cuando. É um meio estável relativamente recente. Distingue-se apenas uma subunidade:

Via - Maciço do Alto Zambeze: é caracterizado por ser um relevo estabilizado há muito, onde a relação pedogénese/morfogénese é favorável à pedogénese;

VII - Orla Litoral: compreende a faixa do litoral, contígua ao Oceano Atlântico, sendo a norte a extensão compreendida entre a localidade de Cabolo (Sumbe) até Cabinda, com largura que varia de 100 à 200km. É uma região de aplanção recente devido à abrasão marinha, a oeste, e ao recuo da escarpa litoral, a leste. Está em equilíbrio a relação pedogénese/morfogénese. No seu extremo sul evidencia-se a subunidade seguinte:

VIIa - Deserto de Namibe (Moçâmedes).

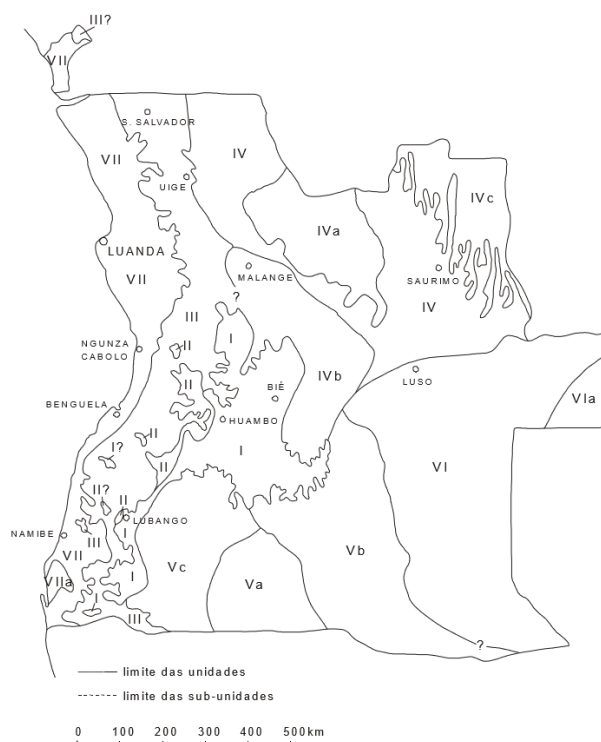


Figura 2.2 - Mapa geomorfológico de Angola (Marques, 1977)

Geologicamente, o território de Angola é constituído por diversas rochas metamórficas, ultrametamórficas, sedimentares e vulcânicas do Arqueano, Proterozóico e Fanerozóico. As rochas vulcânicas do arqueano dividem-se por dois grupos em função da sua idade: Eo-Paleoarqueano e MesoNeoarqueano, cuja separação de idade está avaliada em cerca de 3.000+/-100 Ma. São, normalmente, constituídas por rochas metamórficas, ultrametamórficas e intrusivas, que se formaram nas denominadas regiões de escudos.

As do primeiro grupo (Eo-Paleoarqueanas ou inferiores), por sua vez, podem ser distinguidos por, nomeadamente: (i) Eo-arqueanas e têm na sua constituição, dentre outros, plagiognaisses, anfibolitos, eclogitos, quartzitos e podem ser localizados nas áreas de escudos do Maiombe, de Angola e do Cassai, ao passo que o (ii) Paleoarqueanas, tem na sua constituição, dentre outros, quartzitos e tonalitos, gnaisses biotítico-hornebléndicos, biotíticohiperstênicos, distênicos e grafitosos; anfibolitos, xistos biotíticos e bimicáceos, leptitos, plagiogranitos e plagiomigmatitos associados e estendem-se pelas áreas de escudos do Maiombe, de Angola, do Cassai e do Bangweulo, quase sempre relacionadas com as do primeiro grupo. Já o segundo grupo, Meso-Neoarqueano ou Superiores, é composto pelas rochas denominadas metassedimentares com metamorfismo de fácies anfibolítica e de xistos verdes, identificados nos escudos nos de Maiombe, Angola e Cassai. Têm idades aproximadas estimadas de 2.650 ± 75 Ma.

O grupo de rochas proterozóicas dividem-se igualmente por dois grupos em função da sua idade, nomeadamente: o Paleoproterozóico ou inferiores e o Meso-Neoproterozóico ou superiores, separados pelo limite de idade de 1.650 ± 50 Ma. As rochas metamórficas do Paleoproterozóico, diferentemente das do Arqueano, revelam maior número de variações de fácies. De acordo com as características litológicas e faciais, distinguem-se dois tipos, nomeadamente: (i) rochas verdes e depressões (Troughs), são rochas caracterizadas por grandes espessuras e composição variada de rochas vulcano-sedimentares, identificadas nas na parte sudeste do escudo de Angola (zona de Cassinga) e no escudo do Maiombe (zona de Lufico-Cabinda); (ii) de arqueamentos regionais, rochas caracterizados por extensão descontínua, espessuras relativamente pequenas e composição predominantemente terrígena, identificadas nos escudos de Angola (zona do Oendolongo), Cassai (zona da Lunda) e Bangweulo (zona do Alto Zambeze).

Apresenta-se a Carta Geológica de Angola (Araújo *et al.*, 1988) produzida pelo Instituto Nacional de Geologia à escala 1:1.000.000.

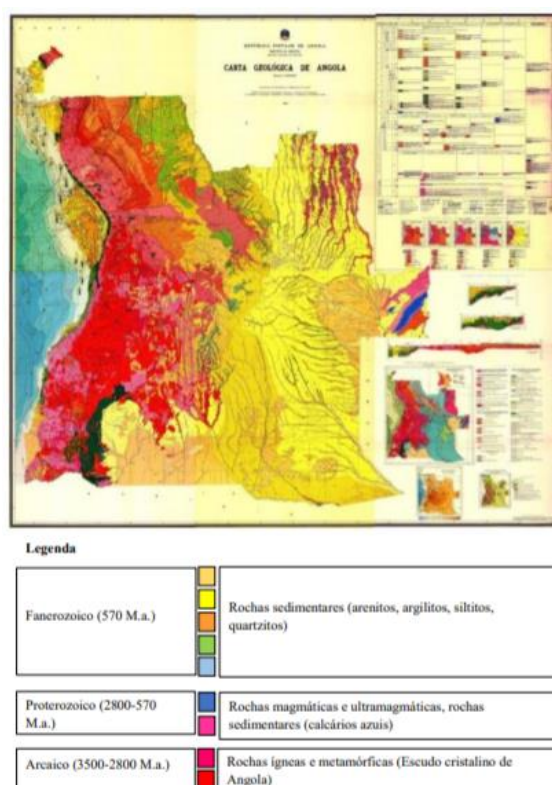


Figura 2.3 - Carta geológica de Angola (Araújo et al. 1988)

Em Angola podem ser identificados os seguintes tipos de solos (Costa, 1968):

- *Solos poucos evoluídos*: Psamo-regossolos, Solos rególicos, Aluvionares (fluviais e marinhos), calcários (normais: pardos e vermelhos, com crosta calcária e halomórficos);
- *Barros*: fitomórficos (negros fitomórficos, pardos litomórficos, pardo-avermelhados litomórficos), topomórficos;
- *Solos arídicos tropicais*: normais (arídicos-pardos cinzentos, pardos-avermelhados), arídicos halomórficos, arídicos da crosta calcária;
- *Solos calsialíticos de regiões sub-húmidas e húmidas*: litocalsialíticos de regiões sub-húmidas e húmidas (pardo-cinzentos litocalsialíticos de regiões sub-húmidas e húmidas, pardo-avermelhados lito-calsialíticos de regiões sub-húmidas e húmidas) topocalsialíticos de regiões sub-húmidas e húmidas (pardo-cinzentos topo-calsialíticos de regiões sub-húmidas e húmidas);
- *Solos francamente lavados à lavados*: oxisialíticos (oxisialíticos pardo-cinzentos, oxisialíticos pardo-avermelhados), oxipsamíticos (oxipsamíticos pardacentos);

Solos fersialíticos tropicais (com ou sem laterite): eutro-fersialíticos (eutro-fersialíticos pardacentos e eutro-fersialíticos crómicos), tipo-fersialíticos (tipo-fersialíticos pardacentos e

tipo-fersialíticos crómicos), psamo-fersialíticos (psamo-fersialíticos pardacentos e psamo-fersialíticos crómicos);

- *Solos podzolizados*: francamente podzolizados;
- *Solos paraferalíticos (com ou sem laterite)*: eutro-paraferalíticos (pardacentos e crómicos), tipo-paraferalíticos (pardacentos e crómicos), braqui-paraferalíticos (pardacentos e crómicos) e psamo-paraferalíticos (crómicos);
- *Solos ferralíticos (com ou sem laterite)*: francamente ferralíticos (pardacentos, amarelos e vermelhos) ferralíticos típicos (não húmidos – amarelos e vermelhos; húmidos - vermelhos), psamo-ferralíticos (amarelos e vermelhos);
- *Solos hidromórficos*: não húmicos (gley e psamo-hidromórficos) húmicos (glei-húmicos, psamo-hidromórficos húmicos);
- *Solos orgânicos*: *orgânicos hidromórficos* (turfosos: glei-turfosos, psamo-turfosos).

Para além destes grupos, existem ainda algumas indicações de solos complementares como:

Solos litólicos: derivados de rochas consolidada pouco ou nada meteorizada com 20 a 40 cm de profundidade;

Solos diversos com materiais lateríticos próximos da superfície: solos com minerais com a presença de materiais lateríticos e/ou outros ferruginosos com profundidade inferior à 40cm;

Solos não especificados: a sua distribuição geográfica ainda não é conhecida;

Areias da praia: são materiais não consolidados arenosos e de mineralogia bastante variada, depositados em plataformas ao actual nível do mar e regularmente atingidas pelas marés;

Dunas do deserto: materiais não consolidados arenosos e essencialmente quartzosos nos quais não actuou ainda o factor biótico de modo visível;

Terreno rochoso: terrenos constituídos predominantemente por formações rochosas sem acumulação considerável de produtos de meteorização in loco (conduzindo unicamente à diferenciação de litossolos ou por vezes a de solos litólicos) e na maior parte dos casos mais ou menos acidentado e montanhoso.

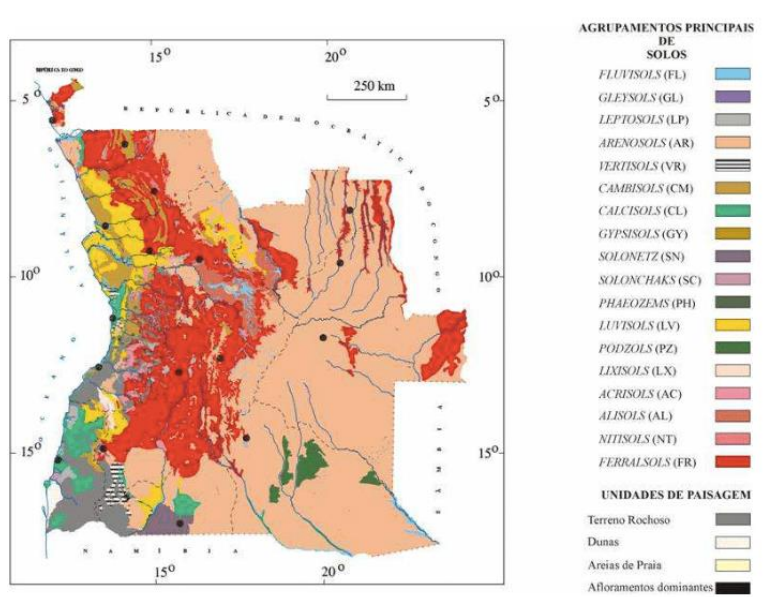


Figura 2.4 - Versão simplificada da carta generalizada de solos de Angola, 4ª aproximação (Ricardo, Raposo1 & Madeira, 2005)

2.3. CARACTERIZAÇÃO E EVOLUÇÃO DAS UNIDADES GEOTECTÓNICAS DE ANGOLA

Segundo (Torquato *et al.*, 1977), e (Silva, 1974) Angola é caracterizada por 6 unidades geotectónicas principais (Figura 2.5) a saber:

- *Escudo angolano*: termo usado para denotar/caracterizar a parte do *Craton* do Congo, que é parte integrante da Plataforma/placa africana, cuja parte de Angola localiza-se entre o meridiano 18° Este e o Oceano Atlântico e o Paralelo 10° Sul e a fronteira Sudoeste de África. Tem uma idade geológica de aproximadamente 500-2000 Ma (milhões de anos). Consolidou-se a partir da plataforma da era Eburneana, tendo sofrido vários eventos orogénicos que resultaram nas actuais características da rocha (Huang, 1954).

Arco do Zaire: situada no Noroeste de Angola, está limitada à Este pela cintura do grupo oeste do Congo, com eixo na zona *offshore* do oceano Atlântico. É tida como resultado de uma grande anteclise com flancos na zona costeira (arco do Zaire) e a região brasileira entre os afloramentos da Formação de Macaubas e o mar. Pese embora não se tenha uma estimativa aproximada da sua idade geológica, supõe-se que tais formações ocorreram depois dos eventos Pan-africanos (446Ma) e antes da sedimentação da Baixa Lutoe (*Lower Lutoe* (Carboniferous)), de acordo com (Dehall *et al.*, 1971) e (Cahen *et al.*, 1963).

- *Arco de Moçâmedes*: trata-se de um arco formado pelos sedimentos do Grupo Oriental/do Oeste do Congo e *Kalahari*, cujo centro está situado na região de Lucira e Cabo de Santa Maria. Teve movimentações durante o grande período de grande actividade magmática fanerozóica (há 130Ma), tendo como localização inicial o Norte de Moçâmedes e movimentando-se em

direcção ao *Graben* do Lucapa. O referido evento de migração ocorreu, igualmente, noutras partes do mundo, em especial no Brasil, na zona de Ponta Grossa onde as variações são similares às do Arco de Moçâmedes. Não é possível precisar a sua idade geológica. Supõe-se que tenha ocorrido antes da intrusão das rochas alcalinas e após as formações do Grupo Oriental/do Oeste do Congo e *Kalahari*.

Graben de Cassange: trata-se de uma formação geológica muito conhecida, que corta a Plataforma/placa africana com direcção principal N 28 W. No território angolano tem, aproximadamente, um comprimento de 800Km e largura de 230 Km. Não é possível estimar a sua idade geológica, entretanto, prevê-se que o seu processo de formação foi complexo e tenha, provavelmente, perdurado por um extenso período.

- *Horst do Cuanza*: trata-se de um bloco de rochas constituído, principalmente, por *charnokites* e *granulites*. Atravessa o Grupo Oriental/do Oeste do Congo em direcção Este-Oeste, abrangendo as cidades de Malange e Cuanza-Norte (ex Salazar). A referida cintura está ligada ao Complexo de *Charnokites* de Kasai, passando pela região do Cuango (Delhal *et al.*, 1976). De acordo com o mapa da Bacia do Kuanza em direcção ao Oeste, verifica-se a existência de falhas transcorrentes, que deram origem à formação do Horst do Cuanza, e continuam através dos sedimentos mesocenóicos e desaparecem no meio da plataforma continental. Provavelmente, as referidas falhas, são resultado do processo de reactivação da formação do Escudo de Angola. Não é possível estimar a sua idade geológica.
- *Arco do Congo*: são formações que se localizam, exclusivamente, no Noroeste de Angola, compreendendo as regiões de Santo António e Cabinda. Tem orientação N75 E e pressupõe-se que seja resultado da reactivação da *Craton* do Congo. Prevê-se que tenha ocorrido antes da deposição de sedimentos da Bacia de Cabinda e Santo António e Zaire, e depois da formação do Arco do Zaire.

Segundo (Torquato *et al.*, 1977) as formações geotectónicas de Angola passaram por várias fases de cratonização, durante a era Precambriana, tais como: a fase de formação do complexo de base, a fase de transição, a fase de estabilização e a fase de reactivação. Este faseamento garantiu a consolidação de características próprias, que, por sua vez, permitem a distinção entre as várias fases, tendo como base a informação geocronológica das formações.

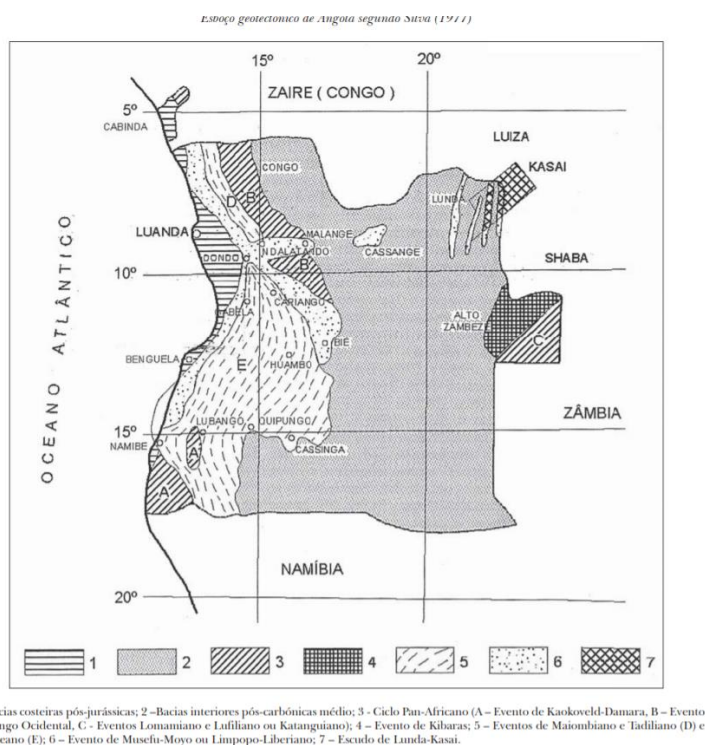


Figura 2.5 - Esboço tectónico de Angola (Silva, 1974)

2.4. PRINCIPAIS EVENTOS SÍSMICOS

2.4.1. PRINCIPAIS EVENTOS NO MUNDO E ÁFRICA

Vários eventos sísmicos têm sido registados por todo mundo com as mais variadas escalas de magnitude e de intensidade, causando grandes perdas humanas e económicas. Segundo (Charleson, 2008), cerca de 70% dos sismos ocorrem ao longo do perímetro da placa tectónica do Pacífico, e 20% ao longo do sudeste da borda da placa da Eurásia que vai do Mediterrâneo às Himalayas. Os restantes 10% ocorrem no resto do mundo (Figura 2.6).

As estações de controlo sismológico registam vários eventos de pequena magnitude e poucos de grande magnitude na escala de Richter. É expectável que ocorram, todos os anos, em média, 200 sismos de magnitude 6, 20 de magnitude 7 e 1 de magnitude 8 ou superior, sendo, entretanto, difícil prever o local e o período em que possam ocorrer, embora se saiba que maior parte ocorre ao longo da placa do Pacífico.

Em África têm ocorrido vários eventos sísmicos (Figura 2.7). Segundo dados do USGS, desde os tempos mais longínquos (ano 1500) estão registados mais de 20.000 eventos sísmicos com magnitudes acima de 2.5 na escala de Richter, como se verifica na Figura 2.6. Entre estes eventos, destacam-se os sismos ocorridos na Tanzânia, no ano 1910, na região de Lago Tanganyika, com magnitude 7.3. O sismo ocorrido no Egito no ano 1995 com magnitude 7.2 na escala de Richter, com epicentro a 10Km de

profundidade e um raio de 250 Km, cujos efeitos foram sentidos no Norte do Egipto e parte do território da Arábia Saudita, tendo causado a morte de pelo menos 10 pessoas e danos materiais consideráveis. Destaca-se ainda o sismo ocorrido em Moçambique, no ano 2006, com magnitude de 7.0 na escala de Richter, com foco à profundidade de 11Km, cujos efeitos foram sentidos em algumas localidades da África do Sul (zonas de Louis Trichardt e Phalaborwa, Durban, Middelburg, Johannesburg e Pretoria), do Zimbabwe (cidades de Harare e Mutare), Botswana (Lobatse) e Zâmbia (Lusaka). Provocou a morte de 3 pessoas e 36 feridos, para além da destruição de cerca de 294 edifícios na zona de Espungabera-Beira-Chimoio, zonas na envolvente do epicentro do sismo. Outro sismo no Sudão, no ano 1990, considerado um dos maiores sismos ocorridos no Sudão, com magnitude de 7.2, cujo foco situou-se a 14,9Km de profundidade. Foi sentido na área de Juba e parte do Uganda, tendo causado danos aos edifícios/construções nas áreas de Juba e Uganda. Por fim, pode-se também considerar o sismo ocorrido na República Democrática do Congo, ano 1992, com magnitude 6.4 na escala de Richter e foco a profundidade de 10.8Km. Teve o seu epicentro na RDC e foi sentido no Burundi (localidade de Bujumbura). Provocou a morte de oito pessoas, 37 feridos e a destruição de vários edifícios na zona de Kabalo.

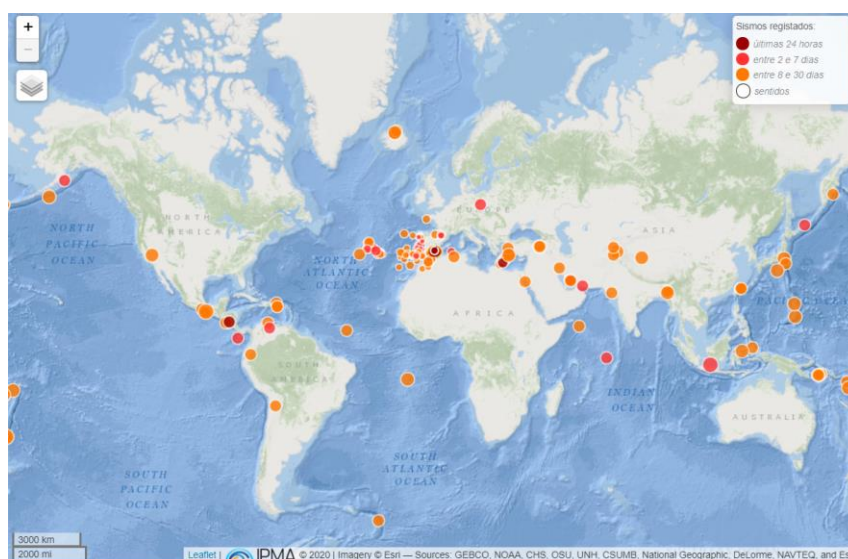


Figura 2.6 - Distribuição geográfica dos sismos, ocorridos até o período de 30 dias com $M > 4$ na escala de Richter (IPMA, Junho 2020, <https://www.ipma.pt/pt/geofisica/sismicidade/>)

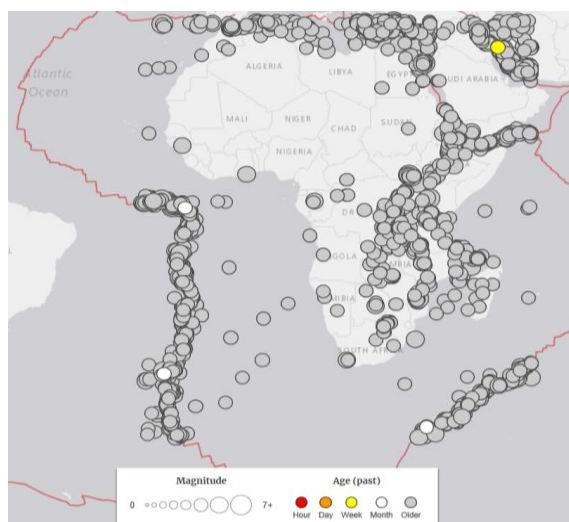


Figura 2.7 - Principais sismos em África desde o ano 1600 (Fonte: USGS, 09-07- 2019, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>)

2.4.2. PRINCIPAIS EVENTOS EM ANGOLA

Em Angola os registos de eventos sísmicos estão disponíveis a partir do ano 1914. Da referida data à presente, foram identificados mais ou menos 129 eventos sísmicos, com magnitudes consideradas de muito fracas à moderadas, distribuídos pelo país com maior concentração de eventos nas zonas sudoeste do país e na faixa Este do país.

Em Angola, os estudos de sismicidade tiveram início no ano 1940, por especialistas dos serviços de Meteorologia da então República de Portugal, tendo resultado no zoneamento das principais regiões sísmicas de Angola (Moreira, 1968). Dado o movimento de luta contra o colonialismo e a intensificação das acções militares, os estudos da sismicidade em Angola foram interrompidos, tendo sido retomados posteriormente, após o fim da guerra civil no país, deixando um período de aproximadamente três décadas sem cobertura da actualização da actividade sísmica.

(Gutenberg & Richter, 1954) relataram o evento sísmico mais antigo, tendo atingido a magnitude instrumental 6.0 Ms, com profundidade de 35 km e coordenadas do epicentro 10° S e 15° E, ocorrido em 24 de maio de 1914 na localidade de Calulo, Província do Kwanza Sul. Entretanto, não há registos de actividade sísmicas desde 1914 a 1945. Assim, descrevem-se os principais eventos sísmicos ocorridos em Angola a partir do ano 1945 até a presente data.

A actividade sísmica ocorrida em Angola no ano 1945 com destaque para os eventos mais notórios (Miranda, 1948) é apresentada abaixo:

- *Tremor de terra de Ganda de 6 de janeiro de 1945* – foi sentido um tremor, tendo o seu início às 20h e duração de 46 s. Embora de pequena intensidade, e não ter causado perdas humanas e económicas, fez-se apenas notar pelas pessoas no interior das residências. Foi registado pela

então estação climatológica da Ganda. Teve uma intensidade de 4º grau na Escala de Rothé e Iº grau na Escala de Davison, no que refere à emissão de ruídos. Manifestou nas direcções Sul-Oeste (SW) e Norte Este (NE).

- *Tremor de terra da Humpata de 26 de abril de 1945* – ocorreu cerca das 4h da madrugada, não permitindo uma activa e rigorosa análise dos seus efeitos, pese embora tenha sido, nitidamente, sentido pelas pessoas no interior das habitações. Teve um epicentro registado na Humpata, tendo sido sentido, em linha recta, na cidade do Lubango (Sá da Bandeira). Na Humpata foi registado com uma intensidade de 5º graus na escala de Rothé e uma emissão de ruídos de IIº grau na escala de Davison, ao passo que, na localidade de Cuito foi registado com uma intensidade de 5º graus na escala de Rothé e uma emissão de ruídos de Iº grau na escala de Davison.
- *Tremor de terra de Ganda de 1 de dezembro de 1945* – pela segunda vez no mesmo ano, foi sentido um tremor com intensidade ligeiramente superior, tendo o início às 10:19, sem registo da sua duração. Teve o seu epicentro na Ganda e foi registada uma intensidade de 5º graus na escala de Rothé e uma emissão de ruídos de IIº grau na escala de Davison. Não causou danos humanos e materiais embora tenha sido sentido pelas pessoas no interior das habitações.
- *Tremor de terra de Lola de 5 de dezembro de 1945* – a localidade de Lola situa-se a sudoeste da serra de Banja, 150Km do litoral, na cidade de Namibe (Moçâmedes), região com altitudes que variam entre 940 e 2340m. Teve início às 7h com sentido Oeste-Este (WE), não tendo sido possível registar a sua duração. Teve intensidade de 4º graus na escala de Rothé e uma emissão de ruídos de IIº grau na escala de Davison. Não causou danos humanos e materiais, mas foi sentido pelas pessoas no interior das habitações.

Moreira, 1968, desenvolveu um trabalho mais aprofundado, registando os principais eventos sísmicos ocorridos no país no período compreendido entre os anos 1943 e 1964. Do trabalho resultou a delimitação das principais zonas sísmicas do país. Assim, existem no país 5 principais zonas sísmicas, conforme apresentado na Figura 2.9 e descrito abaixo:

- *Zona de Cassongue-Ganda-Massano de Amorim*: o conhecimento indica ter ocorrido e sentidos 26 sismos, com epicentro nesta região, em escalas baixas, com exceção de um sismo, ocorrido no dia 12 de julho de 1962, que atingiu a intensidade de VI na escala de MSC, nas localidades de Massano Amorim, Cholo e Cumbira.
- *Zona de Lola-Quilengues-Caluquembe*: trata-se de uma região de fraca atividade sísmica, tendo o sismo com maior destaque ocorrido a 5 de outubro de 1943, tendo atingido grau VI na escala MCS na localidade de Caluquembe.
- *Zona de Sá da Bandeira-Chibemba-Oncócuá-Iona*: trata-se da zona sísmica mais importante de Angola, abrangendo as regiões epicentrais de Quihita e do Iona. O sismo de 9 de maio de 1948 atingiu intensidade VI na escala MCS na localidade de Quihita, e na atividade sísmica do Iona de 15 de janeiro de 1964, o abalo principal atingiu o grau VI-VII.

- *Zona de Gago-Coutinho*: há conhecimento de ter ocorrido no referido período apenas dois (2) eventos sísmicos com epicentro nesta região, tendo um atingido intensidade VI na escala MCS (sismo de 15 de julho de 1960);
- *Zona de Cuima-Cachingues-Cambândua*: é também uma zona de fraca atividade sísmica, entretanto, o sismo de 4 de novembro de 1964 atingiu intensidade VI na escala MCS na localidade de Cachingues.
- *Zona do Alto Zambeze*: foram sentidos apenas dois (2) sismos nesta zona, mas um (1) atingiu intensidade VI na escala de MCS (sismo de 13 de fevereiro de 1947). Nas restantes zonas sísmicas nunca foi ultrapassado intensidade V, no período considerado (Moreira, 1968).

Após o trabalho de Moreira (1968), os trabalhos foram retomados apenas no ano 2003 pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INAMET) e Universidade Agostinho Neto (UAN), tendo sido efectuado o registo dos seguintes eventos sísmicos:

- *Sismo de 11 de maio de 2003*: sentido com intensidade variável entre as províncias do Huambo e Bié, tendo sido sentido com maior intensidade nas localidades do Kuito e Chitembo (Bié), com registo de casas que apresentaram fissuras na sua estrutura. Classificado como tendo atingido intensidade IV na escala MM (Ibarria *et al.*, 2003).
- *Sismo de 29 de maio de 2009*: sentido com intensidade variável em toda extensão do município do Libolo e também segundo contatos feito via radio nos municípios de Quibala e Mussende todos da província do Kwanza Sul, não tendo sido registado qualquer tipo de danos. Classificado como tendo atingido intensidade V na escala MM (Ibarria *et al.* 2009).
- *Sismo de 26 de março de 2010*: sentido com intensidade variável nas localidades de Quibaxi, Bula Atumba e Nambuagongo, província do Bengo, que partilha fronteira com a província de Luanda. Classificado como tendo atingido intensidade IV na escala MM. Os autores do referido relatório afirmaram que a área de ocorrência não está associada com as principais regiões sísmicas definidas por Moreira (1968) (Ibarria *et al.*, 2010).
- *Sismo de 22 de abril de 2013*: sentido com intensidade máxima no município de Chicomba, província da Huíla, onde foram afetadas duas (2) residências. Classificado como tendo atingido intensidade VI na escala MM (Ebo *et al.*, 2013a).
- *Sismo de 19 de novembro de 2013*: sentido com maior intensidade no município de Cassongue, e menor intensidade no município do Seles, província do Kwanza Sul. Classificado como fraco a moderado, tendo atingido intensidade V na escala MM (Ebo *et al.* 2013b).
- *Sismo de 18 de janeiro de 2017*: segundo o jornal de Angola, foi sentido na província da Huíla, nas povoações de Caluquembe e Chicomba, Sul de Angola, um sismo, de escala reduzida, sem prejuízos económicos e perdas humanas (Jornal de Angola, 18/01/2017).

As zonas sísmicas de Angola foram definidas com base na frequência dos eventos sísmicos ocorridos no território, descritos anteriormente. Conforme a Figura 2.8 (USGS, 2019), é possível verificar a localização dos principais eventos sísmicos as zonas de maior ocorrência de sismos, determinantes para a delimitação das zonas sísmicas em Angola. Na figura 2.9 é apresentada a distribuição temporal dos referidos eventos com base em magnitudes históricas (Neto, 2014).

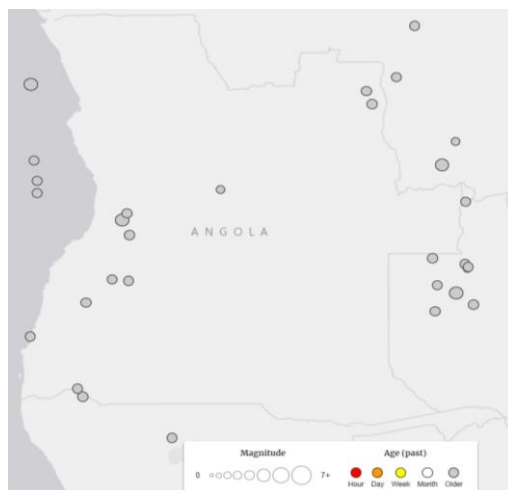


Figura 2.8 - Principais eventos sísmicos em Angola (Fonte: USGS, 09-07- 2019, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>)

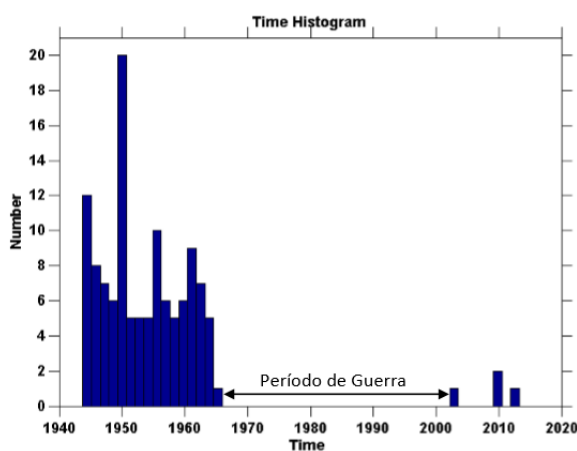


Figura 2.9 - Distribuição temporal da sismicidade histórica angolana (Neto, 2014)

Quanto a sismicidade instrumentada, (Neto, 2014) apresentou os dados instrumentais dos sismos ocorridos em Angola, compilados a partir de Boletins Sísmicos Internacionais (ISC e USGS). Por exemplo, o evento ocorrido no dia 19/11/2013 não só foi registado nas bases de dados da barragem hidroelétrica de Capanda como também pela *Incorporated Research Institution for Seismology* (IRIS), que registou e identificou as formas das ondas de propagação. Os boletins sísmicos mundiais (ISC e USGS) através da sua rede sismográfica internacional registaram cerca de 116 eventos sísmicos em Angola, cobrindo o período de 1914 a 2014. Do total, os eventos com $M < 3.0$ foram excluídos e dada

a distância entre a localização das estações, e de forma a obter dados mais precisos, o catálogo ficou reduzido para apenas 70 eventos, conforme apresentado na figura 2.10.

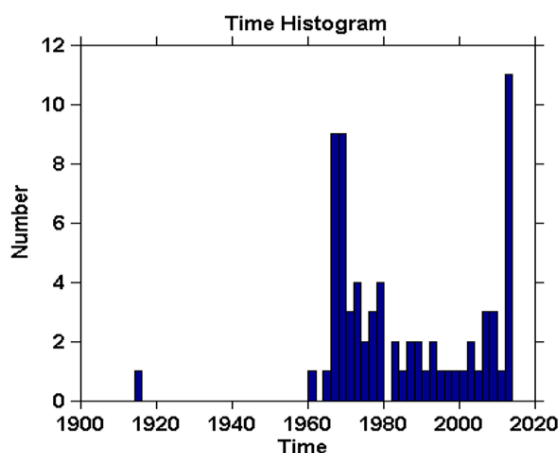


Figura 2.10 - Distribuição temporal da sismicidade Instrumental angolana. Fonte: (Neto, 2014)

2.4.3. TEMPO DE RECORRÊNCIA

O comportamento sísmico de uma determinada região pode, igualmente, ser medida pelo tempo de recorrência ou período de retorno, que é o tempo estimado que decorre entre a ocorrência de eventos sísmicos com determinada magnitude numa falha tectónica ou fonte sísmica de uma dada região. É tida como função inversa da probabilidade da ocorrência de dado evento sísmico com características semelhantes.

$$T(x) = \frac{1}{p(x)} \quad (2.1)$$

Onde $T(x)$ é o período de recorrência/retorno do evento x e $p(x)$ é a probabilidade de ocorrência do mesmo evento num determinado tempo.

Com base nos dados processados, são apresentadas na figura 2.11 os gráficos dos períodos de recorrência para os eventos da sismicidade com base em magnitudes histórica e a instrumental. O gráfico na imagem a esquerda mostra os períodos de retorno para magnitudes de sismos históricos com $M \leq 6$. O gráfico mostra que o período de retorno para eventos de $M=6$ é de aproximadamente 1000 anos. No gráfico à direita, mostram-se os períodos de retorno para eventos sísmicos instrumentais com $M \leq 8$. Eventos com $M = 8$ têm um período de retorno de aproximadamente 700 anos ao passo que eventos $M = 6$, têm períodos de retorno de cerca de 100 anos. Esta diferença deve-se ao facto da identificação do mais antigo evento sísmico identificado por instrumentos no ano de 1914.

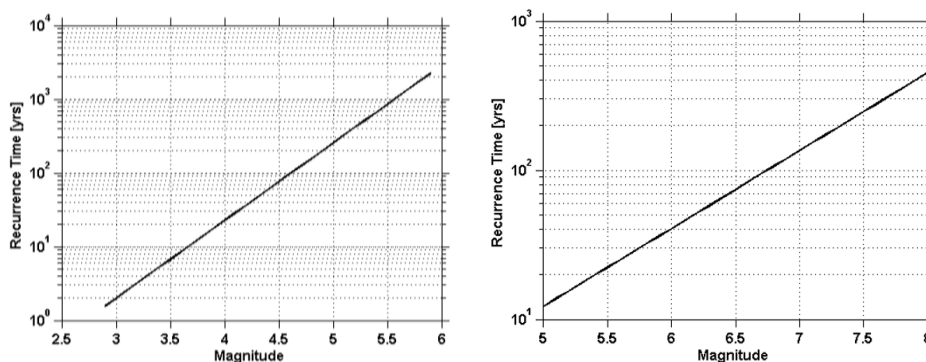


Figura 2.11 - Tempo de recorrência para magnitude histórica (esquerda) e para magnitude instrumental (direita).
Fonte: (Neto, 2014)

2.5. ZONEAMENTO SÍSMICO DE ANGOLA

Com base na informação histórica, foi apresentado um mapa (Figura 2.10) com as principais zonas sísmicas do país. É possível verificar que a maior parte dos eventos sísmicos foram registados na região sudoeste do país, compreendendo as províncias do Namibe e Lubango e parte da província de Benguela, propriamente nas regiões de Cassongue-Ganda-Massano de Amorim, Lola-Quilengues-Caluquembe, Sá da Bandeira (Lubango)-Chibemba-Oncócuia-Iona. Há igualmente o registo de ocorrências de muito fraca intensidade na zona do Nordeste do país, na província da Lunda-Norte. Vale ressaltar que a referida região partilha fronteira com a República Democrática do Congo, país com registos de eventos sísmicos de magnitudes elevadas. Na zona centro-leste no país, na província do Moxico é, igualmente, considerada uma zona sísmica pelos eventos ocorridos na Bacia do Zambeze.

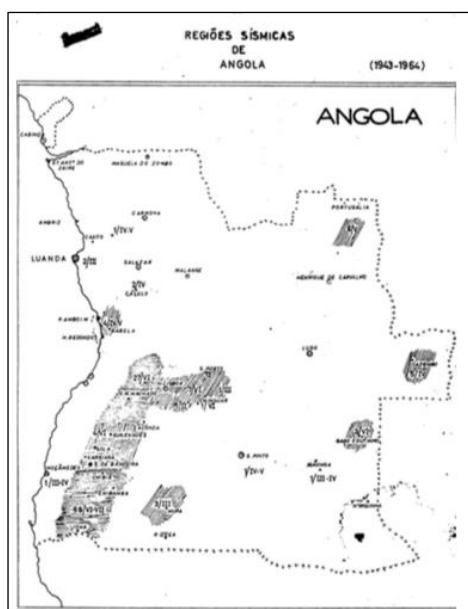


Figura 2.12 - Mapa com as regiões sísmicas de Angola (áreas ranhuradas) no período entre 1943-1964 (Moreira, 1968)

Angola continental está localizada mais a Sudoeste da Placa africana, área com actividade sísmica classificada de fraca a moderada (Neto, 2014), sendo a sua perigosidade definida com base nos eventos sísmicos ocorridos *onshore*. Os principais eventos sísmicos tiveram lugar na zona sudoeste do país, que compreende as províncias da Huíla, Benguela, Namibe e parte do Cuanza-sul, sendo, portanto, estas consideradas como maior área sismogénica do país. Com base nas fontes em questão, pode-se considerar que existem 3 principais linhas sísmicas no país, cujos traçados são possível de localizar: uma, da Humpata à Quihita; outra, da Humpata à Ganda, passando por Lola e Quilengues; finalmente, a terceira, de Quilengues à Caconda com possível internamento em direcção a Cachingues (Miranda, 1945 e Moreira, 1968). Após o estudo desenvolvido sobre a sismicidade natural e induzida pela barragem hidroelétrica de Capanda (Neto, 2014), foi apresentado um novo mapa com a localização dos principais eventos sísmicos ocorridos no país desde o ano 1914 a outubro de 2014 (Figura 2.11). A partir do mapa é possível verificar que, para além da concentração de eventos sísmicos na região sudoeste do país, há vários eventos sísmicos com magnitudes instrumental e não instrumental, que se concentram, igualmente, na faixa Leste do país, tendo o maior número de eventos na província do Moxico.

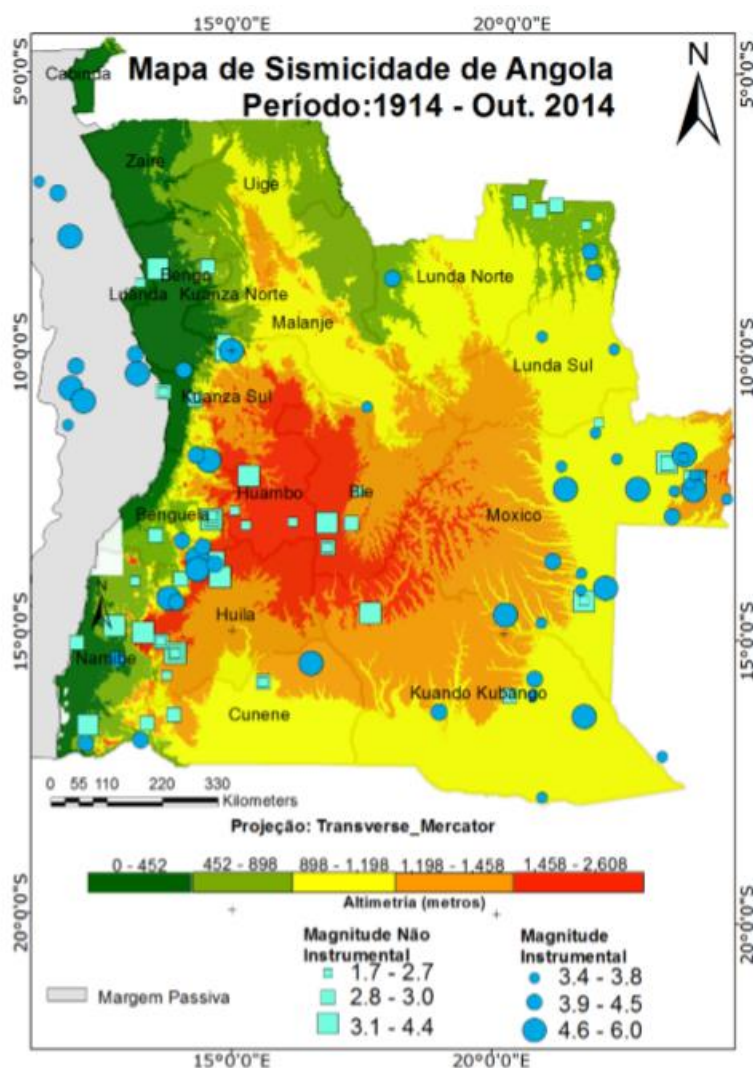


Figura 2.13 - Mapa de Sismicidade histórica e instrumental de Angola, período 1914 a 2014 (Neto, 2014)

2.6. MONITORIZAÇÃO DOS EVENTOS SÍSMICOS

Os sismos são eventos associados ao movimento e vibração do solo que actua na direcção horizontal e vertical. Dependem, em base, dos mecanismos de propagação das ondas (i) de compressão ou primárias – ondas P; (ii) ondas de corte – ondas S e ainda das ondas de superfície (iii) ondas de Rayleigh e ondas Love. Estas últimas propagam-se em movimentos horizontais e verticais, com frequências de vibração que actuam directamente sobre as estruturas enterradas das edificações, causando deslocamento das massas dos elementos diafragma das estruturas (lajes) distribuídas ao longo dos pisos. Neste sentido, é de extrema importância obter-se a percepção da frequência da vibração do solo e, por sua vez, o período de vibração do solo, e correlacionar com o período de frequência da estrutura e caracterizar a resposta da estrutura face às acções horizontais equivalentes sobre a estrutura de forma a quantificar os efeitos.

Os movimentos dos solos, em caso de sismos, são medidos por intermédio de sismógrafos, aparelho que permite converter os movimentos de vibração do solo incluindo os provocados pelas ondas sísmicas e são registados por intermédio de sismogramas, incluindo aqueles mais fracos, para serem perceptíveis em registos visuais. Consistem num sensor que detecta e amplifica os movimentos do solo e regista-os adequadamente.

O país possui instalados apenas 3 estações montadas, sendo uma na província da Huíla (região sul - sudoeste), outra no Moxico (região Este) e outra no Bengo (região norte – noroeste), com uma capacidade para cobrir um raio de 300 Km.

Para além da rede de sismógrafos natural, existe uma rede de sismógrafos instalada em torno da barragem hidroeléctrica. A rede sismográfica nas circunscrições da barragem de Capanda (Figura 2.14) foi instalada a partir de 05/01/2013 e é constituída por 4 estações com digitalizadores Taurus e novos sismómetros triaxiais *Trillium Compact* banda larga. Caracteriza-se como uma rede permanente com transmissão de dados em tempo real e via rádio para a base de dados (Neto, 2014).

Manifesta-se importante aumentar a capacidade de identificação dos eventos sísmicos no país, através da implementação de mais estações sismográficas com capacidade para identificar os eventos de menores magnitudes possíveis.

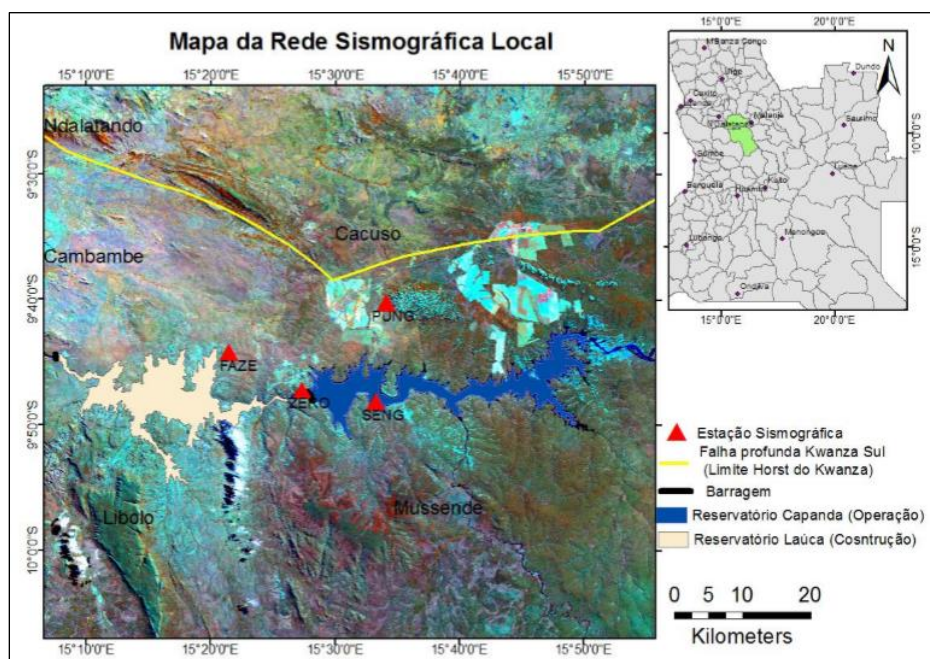


Figura 2.14 - Localização da rede sismográfica de Capanda (Neto, 2014)

3

PERIGOSIDADE SÍSMICA

3.1. INTRODUÇÃO

Com o presente capítulo pretende-se desenvolver o modelo de perigosidade, importante para a definição das zonas com maior probabilidade de ocorrência de eventos sísmicos. Não existem estudos prévios sobre a perigosidade sísmica de Angola, com exceção do estudo desenvolvido pela GEM (GEM, 2018) em que se apresentou o modelo global de perigosidade para o continente africano. Pretende-se, a partir do modelo de perigosidade elaborado para África extrair os valores da aceleração de piso do solo (PGA), com base nos modelos desenvolvidos por (Atkinson & Boore, 2006), (Pezeshk *et al.*, 2011). Dado o factor de amplificação das vibrações do solo, foi necessária a criação de um modelo de amplificação dos solos, determinando a velocidade de corte dos solos a profundidade até 30m da superfície (V_{s30}). Com este modelo, pode-se determinar a população exposta às zonas de maior perigosidade e estimar o valor de perdas económicas, eventualmente, causadas por algum evento sísmico.

A parte oriental de África é conotada como tendo uma actividade tectónica baixa com índices de sismicidade e magnitudes baixas. Algumas falhas tectónicas antigas dentro do *Craton* de África podem ser episodicamente reactivadas, tais como a Linha Vulcânica de Camarões, entretanto os terremotos são fracamente percebidos. Neste sentido, para efeitos do estudo da perigosidade sísmica para a região da África Oriental, foi desenvolvido pelo GEM um catálogo sísmico, compilando de fontes globais (ISC *review bulletin*, GCMT, ISG-GEM, GHEC) e local com base no catálogo do Gana (Amponsah *et al.*, 2012). O catálogo consiste de 114 eventos com magnitudes entre 4 e 6.5, cobrindo um período desde o ano 1636 a 2013, (figura 3.1). O modelo consiste de seis áreas como fontes sísmicas.

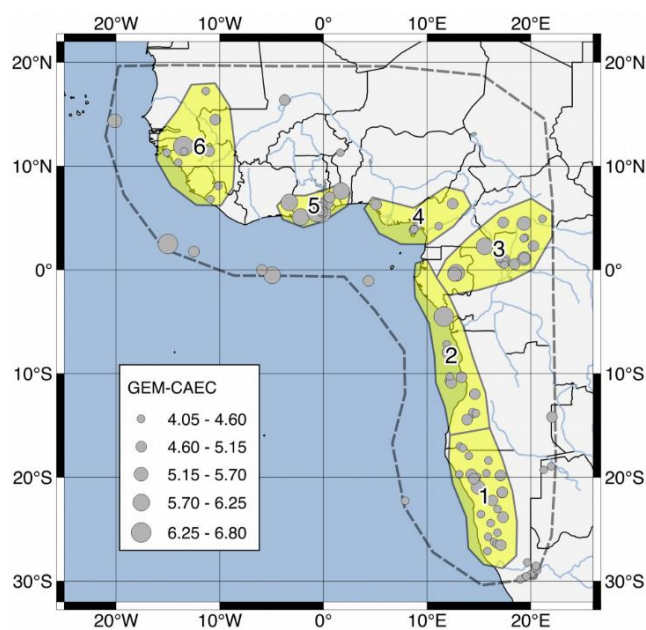


Figura 3.1 - Zonas sísmicas do modelo do Oeste de África (em amarelo) e catálogo sísmico do GEM para África Central (GEM-CAEC). O limite do catálogo sísmico é marcado com a linha descontinua (GEM, 2018)

3.2. MODELO DE PERIGOSIDADE

Existem vários métodos para a determinação da perigosidade de uma região. Normalmente, para países com actividade sísmica acentuada, a perigosidade sísmica é determinada com base na instrumentação da área, usando equipamentos que permitem recolher as acelerações do solo em caso da ocorrência de eventos sísmicos que, por sua vez, disponibiliza dados mais fiáveis e com melhor distribuição possível. No caso em que não haja cobertura suficiente da instrumentação de uma determinada área, a perigosidade é determinada, recorrendo à métodos probabilísticos (PSHA) e determinísticos (DSHA), tendo como base os catálogos sísmicos das regiões. Geralmente, os modelos de perigosidade desenvolvidos com base nos dados da história da sismicidade apresentam um número maior de incertezas associadas (Silva *et. al*, 2014).

Nos últimos 130 anos foram profundamente investigados, embora sem resultados satisfatórios, os métodos de previsão de terremotos que permitissem estimar com fiabilidade e segurança os danos estruturais resultantes da ocorrência de terremotos e, por sua vez, a definição de planos de emergência e evacuação da população (Geller *et al.*, 1977; Geller, 1997; Kagan, 1997; Main, 1999; Kagan, 2014). Tem sido dedicado esforço para a criação de mapas de perigosidade sísmica e a avaliação da sua eficiência. Por exemplo, o mapa nacional de perigosidade sísmica da antiga União Soviética permitiu entender o risco sísmico em várias áreas, com destaque para as regiões da Spitak, Arménia (Muir-Wood, 1993). Refere-se ainda ao mapa nacional de perigosidade sísmica do Japão que permitiu entender o risco na área afectada pelo sismo de Tohoku (Geller, 2011).

Actualmente tem sido muito utilizado o método PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis/Assessment*), proposto por (Cornell, 1968). Com o tempo, vários estudos foram apresentados com base no PSHA (McGuire, 1976; Bender&Perkins, 1987, Hanks&Cornel, 1994; Solomos *et al.*, 2004; Hanks *et al.* 2008). O método PSHA determina os índices/rácios de sismicidade de uma dada região com base na informação da sismicidade histórica, que compila todos eventos sísmicos passados. Para o efeito, é necessário a elaboração de um catálogo sísmico minucioso, com o registo de todos eventos sísmicos relevantes para um largo período de retorno. Entretanto, os catálogos com eventos registados por instrumentos estão disponíveis apenas a partir do ano 1900. Catálogos para um período de 2000 anos estão disponíveis apenas para China, Itália e Japão, e ainda assim, a informação sobre as datas e epicentros não são tão fiáveis. Portanto, dada a insuficiência de dados sobre eventos sísmicos de grande magnitude ocorridos no passado, tem sido usada uma forma indirecta para estimar os eventos sísmicos de grandes magnitudes, extrapolando a lei de Gutenberg-Richter (G-R Law), de magnitudes baixas, usando a metodologia de árvores lógicas muito utilizadas na sismologia, denominada “invariância de escala”. Assim, em zonas com insuficiência de informação, o comportamento de eventos sísmicos com magnitudes altas pode ser inferido de eventos de pequenas magnitudes para as quais existam informações. Entretanto, este processo está associado à várias incertezas.

Já foi referido que o mapa de perigosidade de Angola foi obtido a partir do modelo de perigosidade desenvolvido pelo GEM especificamente para a África Ocidental (GEM, 2019). O modelo foi desenvolvido para toda Costa Ocidental com base num catálogo sísmico unificado para toda região com 114 eventos sísmicos com magnitudes entre 4 e 6,5 Mw, cobrindo o período entre os anos 1636 e 2013.

Para o efeito, e dada a falta de informação calibrada para região subsaariana, foram usados os modelos de atenuação da vibração do solo desenvolvidos por (Atkinson e Boore, 2006) e (Pezeshk *et al.*, 2011), seleccionados por Poggi (Poggi *et al.*, 2017) para região continental estável (SCR) da África Subsaariana. Foi feita a delimitação das principais áreas de fontes sísmicas e os respectivos valores das taxas de recorrência (a) e definidos valores de (b) em função dos valores de (a).

3.2.1. EQUAÇÕES DE PREVISÃO DA VIBRAÇÃO DO SOLO E LEIS DE ATENUAÇÃO

Existem duas leis estatísticas empíricas que orientam a ocorrência de sismos muito conhecidas, nomeadamente: a lei de Gutenberg-Richter (G-R), que dá a relação entre a magnitude e a frequência de ocorrência e a lei de Omori, que dá o grau de danos após ocorrência do sismo com o tempo. As referidas leis apresentam a distribuição das frequências e não a distribuição das frequências (Freedman, 1997).

3.2.1.1. Lei de Gutenberg-Richter (G-R) e abordagens modernas

A lei de Gutenberg-Richter é dada pela expressão (Gutenberg e Richter, 1956):

$$\log_{10} N = a - bM \quad (3.1)$$

onde N é o número de terremotos com magnitude superiores ou igual a M , e a e b são constantes. Em muitos estudos $b \approx 1$. Se a Eq. (3.1) mantém uma escala invariante enquanto M se torna arbitrariamente maior, a energia total libertada por terremoto poderia divergir. Por isso, é necessário fazer um pequeno ajuste à Eq. (3.1) para magnitudes maiores. Até metade da década de 1970 os catálogos sísmicos usavam as magnitudes M_b (*body wave magnitudes*) e M_s (*surface wave magnitude*), (Geller e Kanamori, 1977). Entretanto, com o progresso da sismologia ficou reconhecido que as magnitudes dos sismos medidos a partir de 20s, as amplitudes das ondas de superfície saturavam aos cerca de $M_s = 8.5$ (Kanamori e Anderson, 1975; Geller, 1976) e que o momento escalar mostra-se na Eq. (3.2):

$$M_0 = \mu SD \quad (3.2)$$

onde μ é a rigidez do material na face da falha tectónica, S é a área da falha e D a inclinação média que deve ser usada para quantificar o tamanho dos sismos. Para garantir a continuidade do uso da escala, Kanamori introduziu a escala momento-magnitude, MMS ou M_w (*Moment Magnitude Scale*), com base na seguinte expressão (Kanamori, 1977):

$$\log_{10} M_0 = 1,5M_w + 9,1 \quad (3.3)$$

onde o momento escalar M_0 é quantificado em N.m. Caso M_0 seja quantificada em unidades dyn cm, alteraria a constante e a equação pode ser rescrita:

$$\log_{10} M_0 = 1,5M_w + 16,1 \quad (3.4)$$

Usando as Eq. (3.3) e (3.4) assegura que as magnitudes dos eventos sísmicos extremamente grandes sejam adequadamente quantificadas, enquanto que, ao mesmo tempo, garante que pequenos eventos sísmicos tenham M_w aproximadamente iguais aos seus valores M_s .

3.2.1.2. Lei de Omori e agrupamentos de terremotos

Segundo (Mulgaria *et.al*, 2017), para melhor entendimento da Lei de Omori, apresenta-se a discussão baseada no catálogo sísmico da Itália (Gasperini *et al.*, 2013), que é o resultado de uma cuidada equalização dos registos (sem a observação rigorosa quer da lei de G-R ou a lei de Omori). O catálogo

assume o registo de eventos a partir do dia 01/01/1981 tem magnitudes acima de 2.5 e consiste de 20.547 eventos, incluindo magnitudes eventos sísmicos muito destrutivos com magnitudes acima de 5.5. Para os eventos com $M > 2.5$, cada agrupamento tem um rápido crescimento em termos de índice de ocorrência ao início do agrupamento (e assim, uma ligeira diminuição do tempo/intervalo entre eventos) e uma subsequente ligeira diminuição do índice de ocorrência (e assim, um ligeiro aumento do tempo/intervalo entre eventos). Este comportamento, conforme (Figuras 3.3 e 3.4), é muito bem representado pela lei de Omori, dada pela expressão:

$$\lambda(t) = \frac{k}{(c + t)^{d'}} \quad (3.5)$$

onde $d \approx 1$, e $\lambda(t)$ é a frequência de eventos ocorridos a um determinado tempo t depois do evento inicial, e k e c são constantes (Utsu *et al.*, 1995).

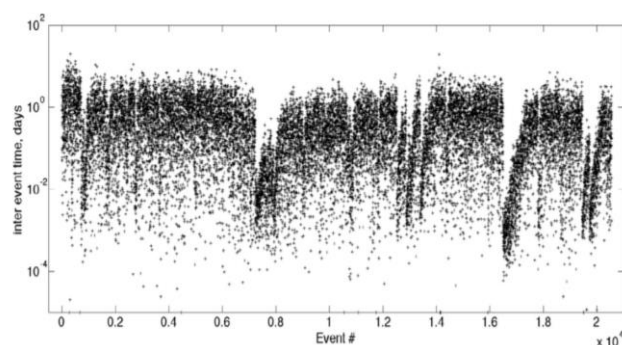


Figura 3.2 - Tempo entre eventos versus número sequencial de eventos para sismos com $M > 2.5$ no novo catálogo sísmico da Itália (Gasperini *et al.*, 2013)

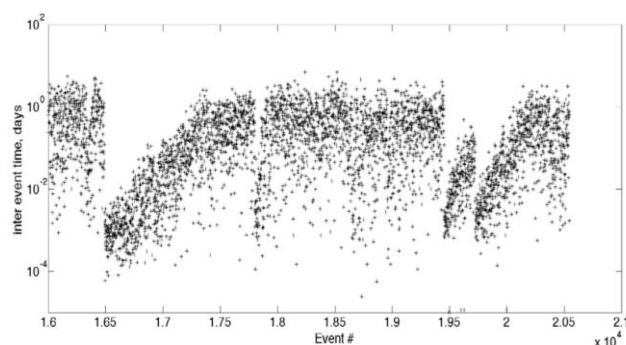


Figura 3.3 - Igual à Fig. 22, com ampliação da última parte para mostrar detalhes sobre o agrupamento de eventos (Gasperini *et al.*, 2013)

3.2.2. CONSIDERAÇÕES DAS CONDIÇÕES DO SOLO

As condições locais do solo influenciam na vibração dos solos durante a ocorrência de um sismo e tem um impacto devastador, observável através dos danos causados às estruturas em vários eventos sísmicos passados (Silva *et al.*, 2014). Por exemplo, no sismo de 1985 de Michoacán ($M_s=8.1$) foi reportado um nível de danos moderado nas proximidades do seu epicentro, enquanto que na cidade do México, localizada a 350Km do epicentro foi observado um nível de dano bem superior, devido a influência das condições do solo (Kramer 1996). Outro caso similar sobre o efeito das condições do solo refere-se ao sismo ocorrido em Portugal em 1755 em Lisboa com $M_w=8.5$ a 9, em que parte do sudeste da cidade de Faro foi parcialmente destruída ao passo que a cidade de Tavira, localizada a 30Km da cidade de Faro e construída sobre rochas e solos calcários duros, teve um registo de vibração de solo bem inferior e sem danos ao nível dos edifícios (Chester, 2001).

Neste sentido é importante considerar o efeito dos solos nos regulamentos sísmicos, recorrendo a coeficientes que alteram a vibração do solo de um dado local em função do tipo de solo. Para definição dos coeficientes considera-se a velocidade média de corte na camada superficial do solo numa profundidade de 30m (V_{s30}). O regulamento dos Estados Unidos da América (BSSC, 2004), voltado às acções sísmicas, requer especificamente esta medida para representar as condições locais do solo. O regulamento europeu EC8 (CEN, 2004) propõe linhas gerais para a definição de parâmetros que permitam a consideração dos efeitos dos solos na acção sísmica.

A obtenção das condições locais do solo, através dos valores V_{s30} , envolve um investimento económico significativo e recursos humanos consideráveis (Silva *et al.*, 2014). Até à data poucos países (Califórnia-USA, Itália, Taiwan, Thessaloniki-Grecia, Austrália) investiram para a obtenção destes dados a uma escala maior. Dada as dificuldades identificadas para o levantamento das condições dos solos, foram desenvolvidos vários estudos no sentido de encontrar metodologias simplificadas para a obtenção do valor V_{s30} , com o principal propósito de ajudar na avaliação do risco sísmico e ao estimar perdas humanas e económicas. Assim, (Wills & Clahan, 2006) estabeleceram a correlação entre as unidades geológicas de Califórnia e a V_{s30} .

Para o caso particular de Angola, nunca foi realizado um estudo profundo para a determinação de V_{s30} , dado que o país é caracterizado por ter actividade sísmica fraca à moderada. Neste sentido, para a determinação das condições locais do solo em todo território nacional foi considerado o método proposto por Wills e Clahan (Wills & Clahan, 2006).

Já (Wald & Allen, 2007) propuseram a metodologia que usa valores das inclinações das rochas e solos, assumindo que materiais mais duros são propensos a se manterem consolidados e apresentam-se em declives íngremes e por isso têm maior valor de V_{s30} , enquanto que materiais de depósitos sedimentares das bacias mais profundas caracterizados por baixa velocidade.

Começou-se por identificar as principais unidades geológicas e de solos de Angola, com base nos mapas (Figuras 2.3 e 2.4). Seguiu-se a identificação da correspondência dos tipos de rochas e solos com as unidades geológicas propostas por Wills e Clahan e Stewart *et al.*, e determinação das respectivas velocidades médias de corte V_{s30} (Tabela 3.1). Com base na distribuição dos tipos de rochas e solos foi determina a percentagem que cada solo ocupa por província, considerando arredondamentos para a

definição dos tipos de solos e rochas predominantes por província. Por fim, foram identificadas as unidades geológicas e solos mais predominantes por província e estimadas as velocidades médias por província, sendo para o efeito, consideradas a máxima velocidade entre as unidades geológicas e solos predominantes da província (Tabela 3.2) e mapa de V_{s30} (Figura 3.3). É possível aferir que o território nacional apresenta velocidades que variam dos 302m/s à 1000m/s, sendo os valores mais baixos verificados nas províncias do Cuando-cubango, Cabinda, Lunda-sul e o mais alto na província do Moxico. Vale ressaltar que os solos e unidades geológicas com valores mais baixos tendem a amplificar a aceleração do solo em caso de ocorrência de sismo. Assim, os valores mais baixos estão em províncias com baixos valores de perigosidade, pelo que não se esperam agravamentos consideráveis das acelerações dos solos.

Tabela 3.1 - Correspondência entre as unidades geológicas de Angola com as categorias equivalentes em Willis e Clahan 2006 e Stewart et al 2008

Unidade geológica em Angola	Área (%)	Categoria geológica equivalente	V_{s30} (m/s)	Valor médio V_{s30} (m/s)
Rochas sedimentares				
<i>Arenitos e conglomerados</i>	10,00%	Arenitos cretáceo (a)	566+/-199	566
<i>Argilitos</i>	40,00%	Depósitos quaternários do Pleistoceno (a)	302+/-46	302
<i>Siltitos</i>	6,00%	Depósitos quaternários do Pleistoceno (a)	302+/-46	302
<i>Quartzitos</i>	6,00%	Rochas cristalinas rochas graníticas do cretáceo, xistos e Gnaisses Precambrianos	748+/-430	748
Grupo de Rochas magmáticas e ultramagmáticas				
<i>Granitos e similares (Granito, Diorito, Diabásio, Basalto, Obsidiana, Pedra pome)</i>	15,00%	Rochas cristalinas rochas graníticas do cretáceo, xistos e Gnaisses Precambrianos	748+/-430	748
<i>Calcário azuis</i>	2,00%	Calcários domílicos e calcários (b)	1000	1000
Grupo de Rochas ígneas e metamórficas				
<i>Ardósia</i>	1,50%	Rochas cristalinas rochas graníticas do cretáceo, xistos e Gnaisses Precambrianos	748+/-430	748
<i>Anfibolito</i>	1,50%	Rochas cristalinas rochas graníticas do cretáceo, xistos e Gnaisses Precambrianos	748+/-430	748
<i>Xisto</i>	13,50%	Rochas cristalinas rochas graníticas do cretáceo, xistos e Gnaisses Precambrianos	748+/-430	748
<i>Mármore</i>	2,00%	Calcários domílicos e calcários (b)	1000	1000
<i>Gnaisse</i>	2,50%	Rochas cristalinas rochas graníticas do cretáceo, xistos e Gnaisses Precambrianos	748+/-430	748

Tabela 3.2 - Unidades geológicas predominantes e V_{s30} por província (Adaptado das cartas geológicas e dos solos de Angola)

Província	Unidade geológica / solo predominante	V_{s30} média (m/s)
Bengo	Metamórficas e ígneas (xistos)	748
Benguela	Ígneas e metamórficas (Ardósia, Anfibolito, Xisto, Gnaisse)	748
Bié	Sedimentares (arenitos, argilitos...)	566
Cabinda	Sedimentares (argilitos, siltitos...)	302
Cuando-cubango	Sedimentares (argilitos, siltitos e quartzitos...)	302
Cuanza-norte	Ígneas e metamórficas (Ardósia, Anfibolito, Xisto, Gnaisse)	748
Cuanza-sul	Ígneas e metamórficas (Ardósia, Anfibolito, Xisto, Gnaisse)	748
Cunene	Sedimentares (arenitos, argilitos...)	566
Huambo	Ígneas e metamórficas (Ardósia, Anfibolito, Xisto, Gnaisse)	748
Huíla	Rochas magmáticas e ultramagmáticas	748
Lunda-Norte	Sedimentares (argilitos, siltitos e quartzitos...)	302
Lunda-sul	Sedimentares (argilitos, siltitos e quartzitos...)	302
Malange	Rochas magmáticas e ultramagmáticas	748
Moxico	Rochas magmáticas e ultramagmáticas (calcários azuis)	1000
Namibe	Rochas magmáticas e ultramagmáticas	748
Uíge	Sedimentares (argilitos, siltitos e quartzitos...)	302
Zaire	Ígneas e metamórficas (Ardósia, Anfibolito, Xisto, Gnaisse)	748
Luanda	Sedimentares (arenitos, argilitos...)	566

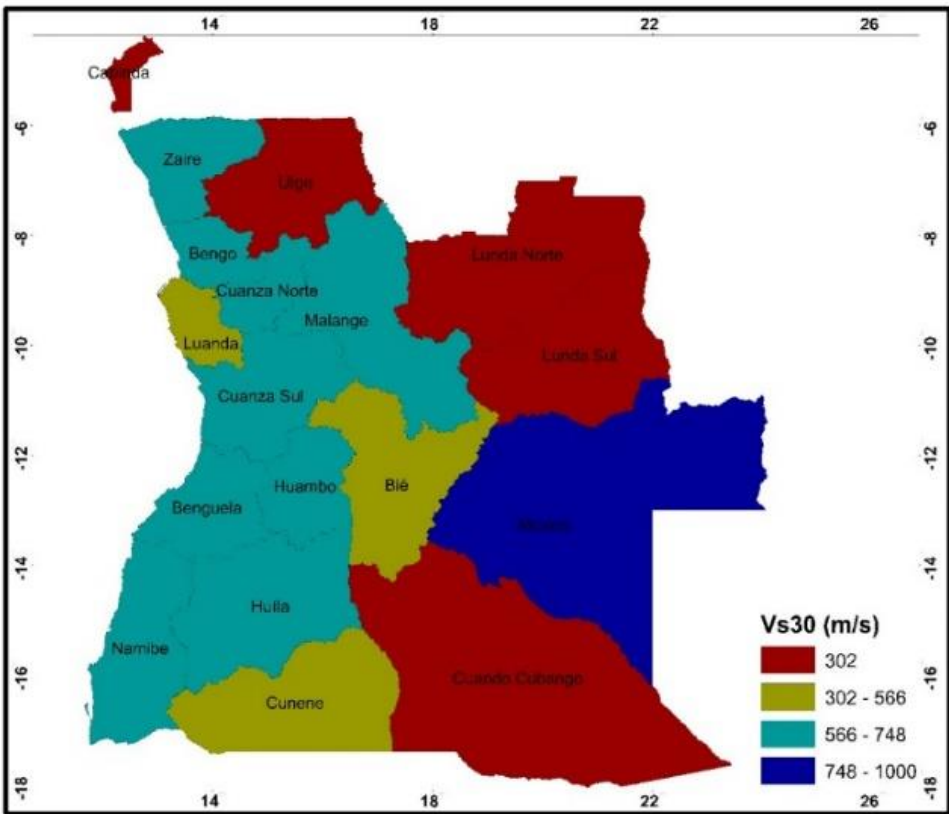


Figura 3.4 - Mapa de Vs30 para o território de Angola, determinado com base nos limites geográficos entre províncias e nas unidades geológicas de Angola com as correspondentes definidas por (Willis e Clahan, 2006) e (Stewart et al., 2008). Fonte: Autor

3.2.3. RESULTADOS

3.2.3.1. Curvas de perigosidade

As curvas de perigosidade para região ocidental da África Subsaariana foram processadas, recorrendo ao software *OpenQuake engine* criado para a computação de acelerações de pico de solo (PGA) e acelerações espectrais (SA) aos 0.2s, 0.5s e 2s. Foi considerada uma grelha com 124.441 locais com espaçamento de 10Km e considerando igualmente as condições locais do solo, com velocidades de corte (V_{s30}) entre 760-800 m/s. A título de exemplo, mostram-se as curvas produzidas para cidade de Accra (Gana), disponibilizadas no modelo elaborado para a região. (Fig. 3.4).

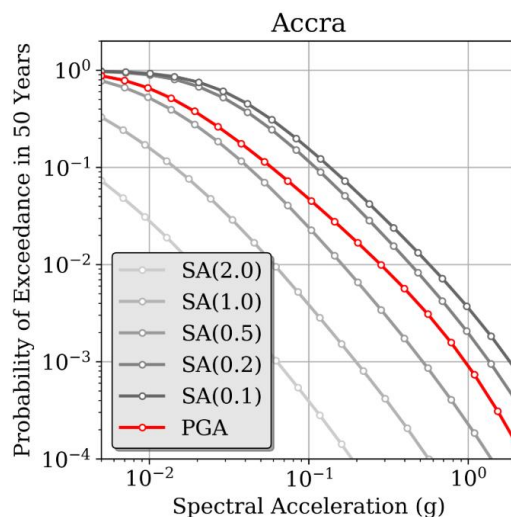


Figura 3.5 - Curvas de perigosidade calculada para diferentes períodos espectrais para cidade de Accra, capital do Gana. (Fonte: <https://hazard.openquake.org/gem/models/WAF/>)

3.2.3.2. Mapas de perigosidade

Foram igualmente considerados os efeitos das condições locais dos solos com base na velocidade de corte da camada (30m de profundidade) superior de solos a uma velocidade (V_{s30}) média que varia de 760-800 m/s. (Fig. 3.6)

No modelo de perigosidade de África Ocidental (Figura 1.3), recorrendo ao *OpenQuake engine* foram extraídos todos os valores da aceleração de pico do solo (PGA), considerando o efeito dos solos, para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos que é geralmente usada para fins de dimensionamento de estruturas para acção sísmica. Para cada província foram gerados vários valores de PGA, cobrindo todo território provincial. Para efeitos da criação do mapa ao nível provincial, e de forma a simplificar, foi assumido o maior valor de PGA (Tabela 3.3 e Fig. 3.7).

Tabela 3.3 - Valores de PGA (m/s^2) - Fonte: OpenQuake engine

Província	PGA (m/s^2)
Bengo	0,05
Benguela	0,07
Bié	0,01
Cabinda	0,03
Cuando-cubango	0,03
Cuanza-norte	0,03
Cuanza-sul	0,05
Cunene	0,04
Huambo	0,05
Huíla	0,07
Lunda-Norte	0,01
Lunda-sul	0,01
Malange	0,02
Moxico	0,11
Namibe	0,04
Uíge	0,02
Zaire	0,03
Luanda	0,04

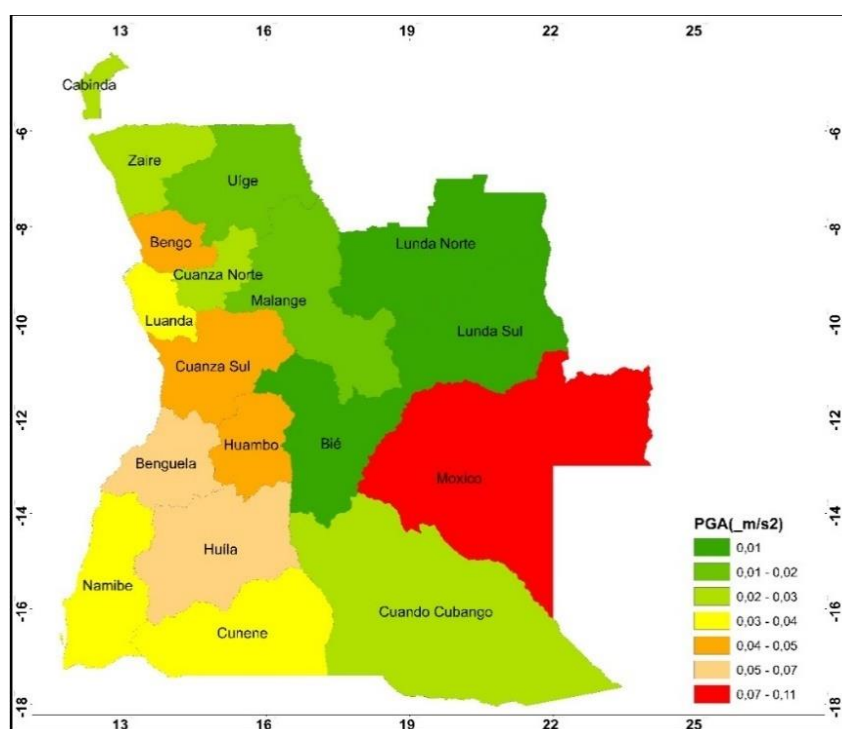


Figura 3.6 - Mapa de Aceleração de pico do solo (PGA)

3.2.3.3. Proposta de zoneamento sísmico de Angola

Com base na distribuição dos valores de PGA, tendo já os efeitos do solo considerados, realizou-se um agrupamento das acelerações com o objectivo de apresentar uma proposta inicial sobre o zoneamento sísmico, em função da perigosidade, para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos. Esta informação é importante pela utilidade futura no cálculo das acções sísmicas de edifícios e infraestruturas a serem implementadas ou num eventual estudo de análise tanto da vulnerabilidade como do risco sísmico do país.

Assim, a proposta de zoneamento sísmico, considera 4 áreas fundamentais, distribuídas em função de intervalos de valores de PGA, conforme tabela 3.4 e Fig. 3.8.

Tabela 3.4 - Tabela 3.4 - Proposta de zonamento sísmico de Angola (Fonte: autor)

Zona sísmica	Valores de PGA (m/s ²)
Zona 1	$ag < 0,025$
Zona 2	$0,025 \leq ag \leq 0,05$
Zona 3	$0,05 \leq ag \leq 0,1$
Zona 4	$0,1 \leq ag \leq 0,15$

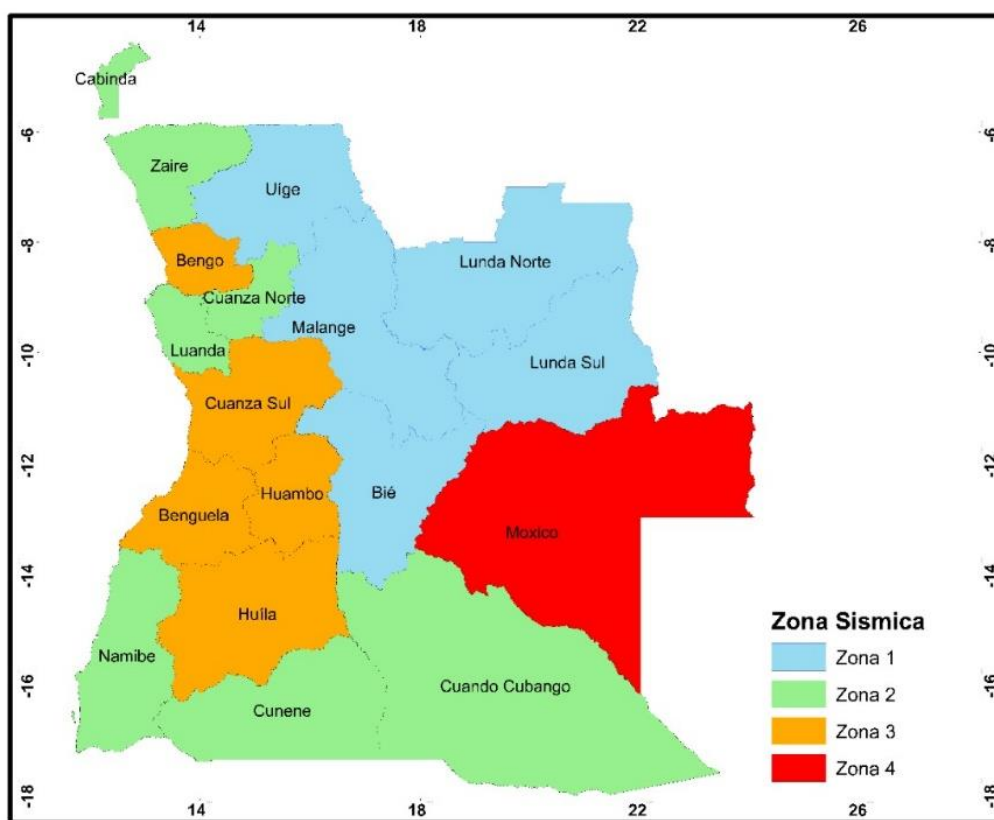


Figura 3.7 - Zonas sísmicas de Angola

3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base no estudo foi possível concluir que Angola encontra-se numa zona cuja perigosidade sísmica é considerada de fraca a moderada. Muitos regulamentos consideram que áreas com PGA acima de $0,25 \text{ m/s}^2$ são tidas como de alta perigosidade, enquanto que áreas com PGA inferiores a $0,10 \text{ m/s}^2$ são de baixa perigosidade. Neste sentido, a máxima aceleração do solo para o período de retorno de 475 anos é $0,11 \text{ m/s}^2$, verificada na província do Moxico com cerca de 17,88% da área do território, sendo considerada de sismicidade intermédia, e o restante país 82,12% da área do território com sismicidade baixa, com valores abaixo de $0,10 \text{ m/s}^2$.

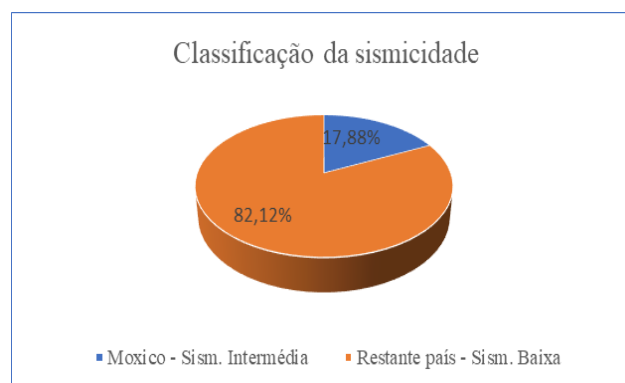


Figura 3.8 - Classificação da sismicidade em território nacional

Em termos de condições do solo, Angola possui unidades geológicas e solos com V_{s30} que variam dos 302 m/s a 1000 m/s, sendo a maior parte do território caracterizado (50%) com valor médio de 748m/s. A província do Moxico é a única que se apresenta com V_{s30} de 1000m/s, o que indica que possui solos e rochas mais consolidadas e por isso tenha maior velocidade de corte e, consequentemente, menores efeitos de amplificação da aceleração do solo.

4

EXPOSIÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Como já referido, a avaliação do risco sísmico considera a confluência dos modelos de perigosidade sísmica, um conjunto de funções de vulnerabilidade capazes de descrever a distribuição e percentagens de perdas a um dado nível de intensidade da acção sísmica e o modelo de exposição que define a distribuição dos elementos expostos à zona com perigosidade (Silva *et al*, 2014). O presente capítulo focar-se-á no desenvolvimento do **modelo de exposição do parque edificado de Angola**.

A criação de um modelo de exposição capaz de apresentar informações sobre a localização e vulnerabilidade à escala maior (nacional) é uma tarefa complexa (Sousa, 2006 – Portugal e Crowley *et al.*, 2008 – Itália). Esta tarefa é, geralmente, conseguida com base em dados de Censos Populacionais e das Edificações ou a partir de modelos de distribuição espacial de edifícios e da população, desenvolvidos pela *U.S. Geological Survey's* (Jaiswal *et al.*, 2010) e pela GEM, através da plataforma *LandScan TM* 2009, que providencia a estimativa do número de edifícios e a contagem aproximada do número da população (Silva *et al.*, 2014).

O modelo de exposição para Angola foi desenvolvido com base na informação do Censo Habitacional realizado no ano 2014 (<https://www.ine.gov.ao/publicacoes/populacao-e-sociedade>). Foi desenvolvido adaptando a metodologia usada para a Modelação do Inventário de Edifícios Residenciais na América do Sul, seguindo 4 passos essenciais: (i) definição das classes das edificações, (ii) mapeamento dos dados do censo para classes de edificações, (iii) mapeamento/conversão de número moradias/agregados familiares em número de edifícios e (iv) determinação dos custos de reposição (Yepes *et al.*, 2016). Dada a insuficiência de informação sobre características das edificações e as limitações identificadas no relatório do censo, muitas suposições foram consideradas de forma a permitir chegar a uma primeira abordagem sobre o modelo de exposição para o parque residencial edificado de Angola, sua distribuição e respectivo valor económico.

4.2. CENSO POPULACIONAL

O Recenseamento Geral da População e Habitação de Angola, que teve lugar no período de 16 a 31 de maio de 2014, vulgo Censo 2014, foi realizado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) de acordo com a Lei 3/11 de 14 de janeiro, Lei do Sistema Estatístico Nacional, e de Legislação conexa aprovada quer pela Assembleia Nacional como pelo Titular do Poder Executivo.

O Censo 2014 foi realizado em colaboração com os Governos Provinciais, Administrações Municipais e Comunaes, as Forças Armadas Angolanas, Polícia Nacional e outras instituições do Estado. Os resultados do Censo 2014 tem como referência o Momento Censitário que ocorreu a 16 de maio de 2014. Os Resultados Definitivos do Censo 2014, mostram que em 16 de maio de 2014, a população residente em Angola era de 25.789.024 habitantes, sendo a província de Luanda a mais populosa com 6 milhões de habitantes, cerca de 27% da população do país, conforme Tabela 4.1. Ao nível nacional a população rural ocupa cerca de 37% e 63% para a urbana, Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - População de Angola à data de 16/05/2014 Fonte: INE, 2016

Província	População (milhares)			
	Urbana	Rural	Total	%
Bengo	155,77	200,87	356,64	1,38%
Benguela	1 427,99	803,40	2 231,39	8,65%
Bié	628,69	826,57	1 455,26	5,64%
Cabinda	593,89	122,18	716,08	2,78%
C. cubango	304,90	229,10	534,00	2,07%
Cuanza-norte	300,36	143,03	443,39	1,72%
Cuanza-sul	723,04	1 158,83	1 881,87	7,30%
Cunene	207,16	782,93	990,09	3,84%
Huambo	963,20	1 056,35	2 019,56	7,83%
Huíla	817,04	1 680,38	2 497,42	9,68%
Lunda-sul	539,92	322,65	862,57	3,34%
Lunda-Norte	424,08	113,51	537,59	2,08%
Malange	552,61	433,76	986,36	3,82%
Moxico	417,52	341,05	758,57	2,94%
Namibe	315,66	179,67	495,33	1,92%
Uíge	578,45	904,67	1 483,12	5,75%
Zaire	443,29	151,14	594,43	2,30%
Luanda	6 760,44	184,95	6 945,39	26,93%
Total	16 153,99	9 635,04	25 789,02	100,00%

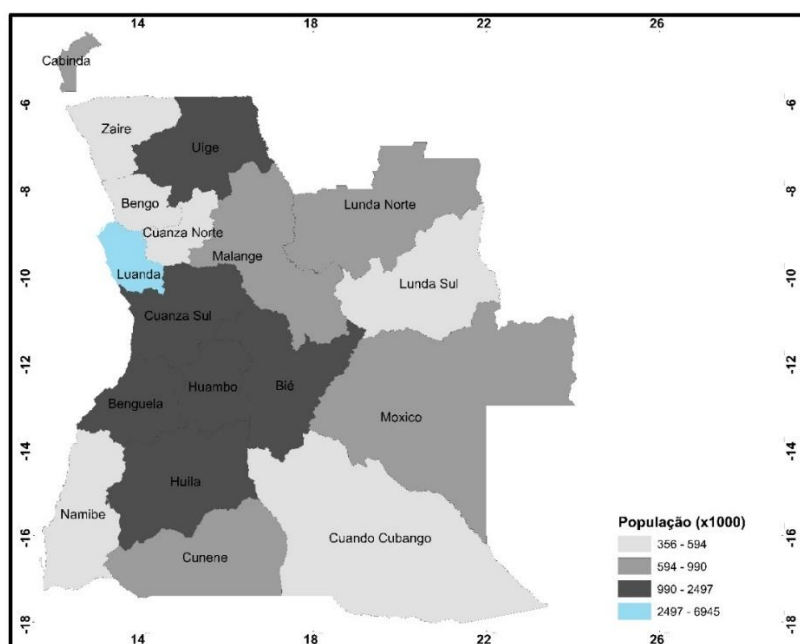


Figura 4.1 - População Angolana distribuída pro províncias – Fonte: INE, 2016

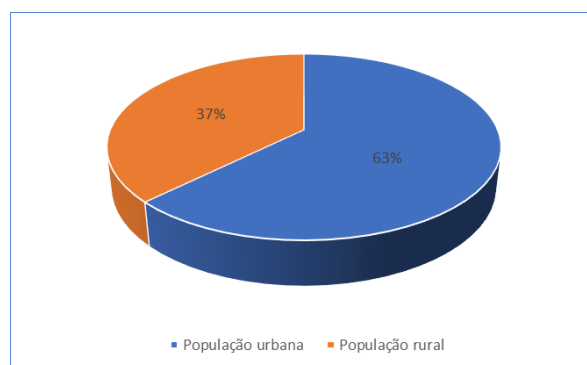


Figura 4.2 - População angolana distribuída pelas áreas urbana e rural – Fonte: INE, 2016

À data do levantamento censitário, estimava-se que o país possuía cerca de 5.544.834 unidades habitacionais. O referido número foi determinado considerando o número de agregados familiares distribuídos por todas as províncias do país, ao nível comunal, distrital, municipal, provincial e por fim nacional. Foi ainda segregada com base nas áreas rurais e urbanas, com 39% e 61%, respetivamente. Cerca de 1,4 milhões de unidades está concentrada na capital do país, Luanda, que representa, à semelhança da população do país, cerca de 27% do *stock* habitacional do país, conforme apresentado na Tabela 4.3 e Figura 4.3.

Tabela 4.2 - Número de agregados familiares / unidades habitacionais. Fonte: INE, 2016

Província	Número de unidades habitacionais (milhares)			
	Urbana	Rural	Total	%
Bengo	34,92	50,66	85,58	1,54%
Benguela	300,03	183,58	483,60	8,72%
Bié	122,52	189,81	312,33	5,63%
Cabinda	139,49	27,76	167,25	3,02%
Quando Cubango	65,04	50,38	115,42	2,08%
Cuanza Norte	64,76	37,23	101,99	1,84%
Cuanza Sul	154,67	273,09	427,76	7,71%
Cunene	43,27	144,09	187,35	3,38%
Huambo	190,77	243,52	434,29	7,83%
Huíla	162,74	351,68	514,41	9,28%
Lunda Norte	119,83	84,66	204,49	3,69%
Lunda Sul	83,20	28,47	111,67	2,01%
Malange	107,44	105,78	213,23	3,85%
Moxico	85,24	77,87	163,10	2,94%
Namibe	60,72	36,31	97,02	1,75%
Uíge	110,92	196,21	307,13	5,54%
Zaire	98,39	35,49	133,88	2,41%
Luanda	1 437,30	47,05	1 484,35	26,77%
Total	3 381,23	2 163,62	5 544,86	100,00%

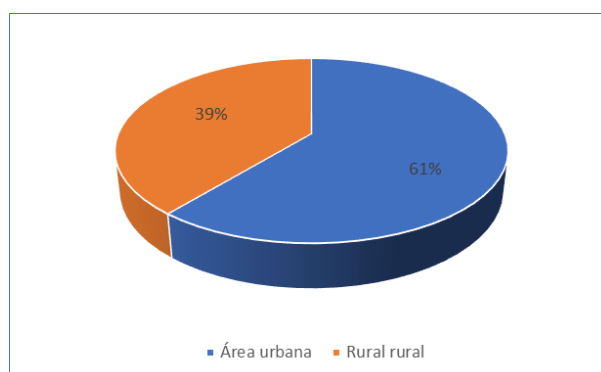


Figura 4.3 - Agregados familiares/unidades habitacionais distribuídas pelas áreas urbanas vs. Rural – Fonte: INE, 2016

Em termos de caracterização das unidades habitacionais, o censo apresenta apenas a informação sobre os materiais de construção usados nos pavimentos/chão, tectos e paredes das unidades habitacionais, tendo ausente a informação como o número de edifícios, anos de construção, custos médios de construção e a sua evolução ao longo do tempo, dados indispensáveis para o desenvolvimento do modelo de exposição e valor económico. Assim, para o desenvolvimento do modelo de exposição foi considerada a informação disponível com as devidas assunções.

Em todo parque habitacional o adobe mostra-se como material de construção predominante usado nas paredes das unidades habitacionais, com cerca de 50% em todo país, seguido do bloco de cimento com cerca de 32%, Tabela 4.3 e a Figura 4.4.

Tabela 4.3 - Número de agregados com base no material de construção usado nas paredes – Fonte: INE, 2016

	Pedra	Cimento/B loco	Tijolo	Adobe	Madeira	Zinco	Pau-a- pique	Outro	Não declarado	Total
Área urbana	11 297	1 743 133	82 512	1 350 236	15 656	109 184	44 139	17 423	7 654	3 381 234
Área rural	2 031	56 132	11 121	1 340 423	3 896	39 112	691 835	16 598	2 474	2 163 622
Total	13 328	1 799 265	93 633	2 690 659	19 552	148 296	735 974	34 021	10 128	5 544 856
%	0,24%	32,45%	1,69%	48,53%	0,35%	2,67%	13,27%	0,61%	0,18%	100,00%

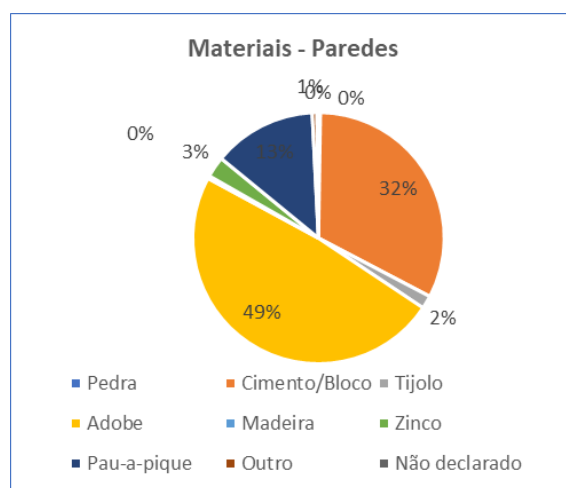


Figura 4.4 - Materiais de construção usado nas paredes – Fonte: INE, 2016

Em termos de material de construção usado para o chão/pavimentos é predominante a terra batida com cerca de 47%, seguido dos pisos de cimento com 32%, Tabela 4.4 e Figura 4.5.

Tabela 4.4 - Nº de agregados com base no material de construção usado no chão/pavimentos - Fonte: INE, 2016

	Terra batida	Cimento	Mosaicos cerâmicos	Adobe	Mármores/g ranito	Tacos de madeira	Outro	Total
Área urbana	980 477	1 656 835	494 664	212 164	12 093	17 338	7 635	3 381 206
Área rural	1 636 923	122 040	12 114	170 096	212 449	7 059	2 480	2 163 161
Total	2 617 400	1 778 875	506 778	382 260	224 542	24 397	10 115	5 544 367
%	47,21%	32,08%	9,14%	6,89%	4,05%	0,44%	0,18%	100,00%

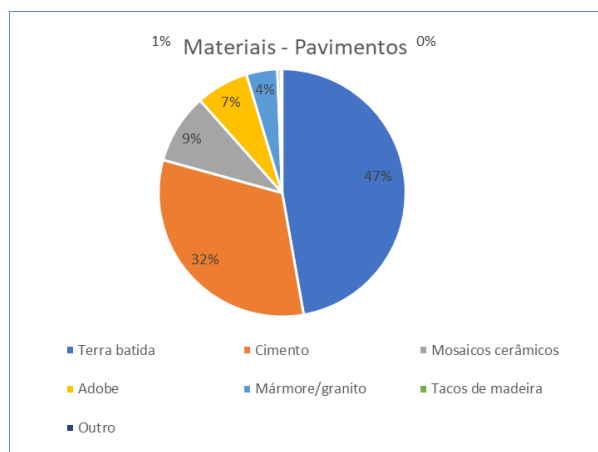


Figura 4.5 - Materiais de construção usado nas paredes – Fonte: INE, 2016

4.3. EVOLUÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL

Várias organizações nacionais e internacionais, desde Instituições Públicas, tais como os Ministérios da Construção do Urbanismo e Habitação, o da Administração Pública e Ordenamento do Território e Organizações não Governamentais tais como a UN HABITAT, OMUNGA e outras, têm apresentado vários estudos sobre a habitação em Angola, analisando, entre outros, temas relacionados com arquitectura, urbanismo e saneamento básico.

Entretanto, não há informação suficiente sobre a evolução dos tipos de edifícios residenciais do parque edificado de Angola com base no sistema estrutural. Neste sentido, sendo Angola ex-colónia portuguesa, com exceção dos principais tipos construtivos predominantes nas áreas rurais de Angola (pau-a-pique e adobe), entende-se que a evolução do parque edificado de Angola, até o período da independência, tenha seguido as tipologias predominantes em Portugal (Figura 4.6) para as zonas urbanas e nas rurais a predominância de edifícios de alvenarias de adobe e pau-à-pique.

Após a independência, nomeadamente na década de 80, surgiram edifícios construídos por empresas cubanas e com sistemas estruturais predominantes em Cuba. Na década de 1990, fruto da movimentação populacional em consequência da guerra fria, foi-se verificando um aumento considerável nas zonas periféricas das cidades de moradias de alvenarias de adobe e blocos de cimento não confinados nas principais cidades do país. Nesta altura, Luanda assistiu a um crescimento urbano acima das suas capacidades, com o surgimento de vários bairros compostos por tipologias estruturais a base de casas de chapas metálicas de zinco, alvenarias não reforçadas e não confinadas. A partir da década de 2000, com o término da guerra fria e na fase de desenvolvimento económico, outro grande fenómeno se deu no país, em especial na cidade Luanda, consubstanciado na construção desenfreada de edifícios muito altos em betão armado, metálicos ou mistos, com lajes fungiformes, aligeiradas e pré-esforçadas, cujos cálculos estruturais foram realizados com base em regulamentos de Portugal (RSA, REBAP), União Europeia (Eurocódigos), Brasil (NBR), China e outras, por representarem a origem de muitas empresas de construção a actuar no país e que, muitas das vezes, elaboram os respectivos projectos estruturais.

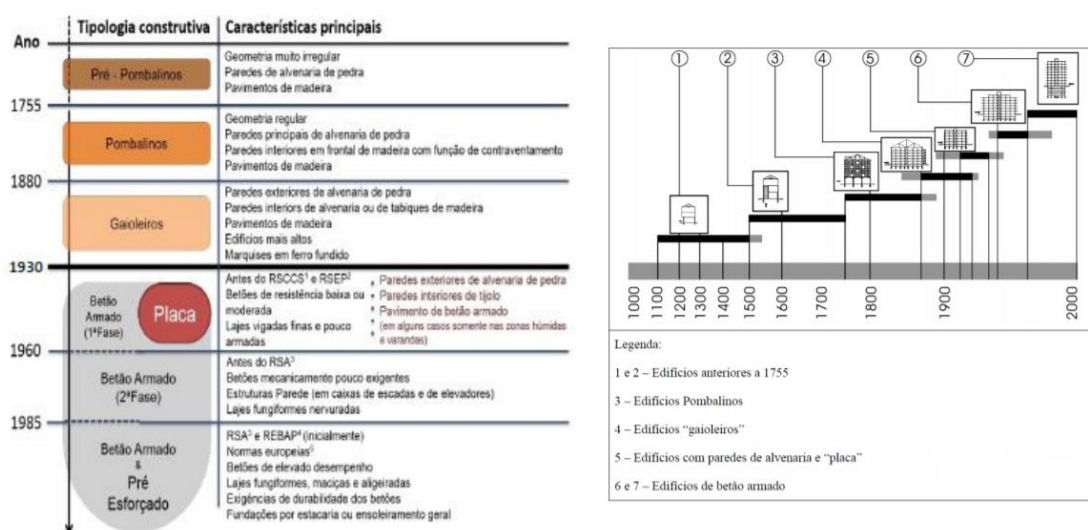


Figura 4.6 - Evolução da tipologia construtiva de Portugal, características principais (à esquerda) e representação da evolução na linha do tempo (à direita) Fonte: (Ferrito, T, 2014; Coias e Silva, 2001)

4.4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE EXPOSIÇÃO

4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL DE ANGOLA

Na caracterização do parque edificado foi implementada a metodologia usada por Yepes (Yepes *et al.*, 2016), conforme referido anteriormente. Teve como objectivo principal a determinação do número de edifícios com base no número de agregados habitacionais obtidos através do relatório do censo, cujos dados foram apresentados previamente.

As classes de edificações foram obtidas de acordo com as tipologias de estruturas, agrupadas com base no comportamento face à acção sísmica. Foi inicialmente necessária a indicação dos principais tipos de edificações existentes no país, desde as mais predominantes quer em áreas urbanas quer nas rurais (Tabela 4.5).

Associada a esta consulta, devem ser realizados encontros com especialistas de uma determinada região ou país para a abordagem sobre temas relacionados com o parque edificado, tipos de edifícios, vulnerabilidades e análise de estudos prévios sobre a matéria. Para o caso específico de Angola não existem informações prévias com base nos relatórios da *World Housing Encyclopedia*. Dado ao facto de Angola não apresentar uma sismicidade histórica com registo de eventos de magnitudes altas e perdas humanas e económicas consideráveis, muitos aspectos sobre a capacidade e sistemas de resistência lateral das edificações não têm sido consideradas. É, portanto, importante iniciar estudos para aprofundar a matéria e permitir a criação de bases com informação sobre a pertinência dos efeitos da acção sísmica no parque edificado em Angola.

Para efeitos do presente estudo, a classificação dos tipos de edifícios quanto ao comportamento às acções sísmicas foi realizada com base na taxonomia proposta pelo GEM (<https://platform.openquake.org/taxtweb/>) (Brzev *et al.*, 2013), que permite que os edifícios sejam classificados com base nos seguintes atributos estruturais: (i) principal material de construção; (ii) sistema de resistência lateral; (iii) número de pisos e nível de ductilidade do sistema, com base no período de construção e a regulamentação considerada para a acção sísmica. Com a classificação dos edifícios com base na semelhança de atributos, é possível assegurar que os modelos de fragilidade/vulnerabilidade sejam compatíveis com o modelo de exposição (que providencia a localização e valor dos elementos em risco) que podem ser desenvolvidos por diferentes comunidades de engenharia (Crowley *et al.*, 2018).

O censo populacional, no que se refere às habitações, possuía apenas informação sobre o material de construção usados na construção de paredes e pavimentos. Portanto, foi possível definir o atributo sem constrangimentos. Entretanto, para a consideração do número de pisos e o sistema de resistência lateral foram feitas algumas suposições, dado que não existe informação disponível no relatório censitário, documento de base para a criação do modelo de exposição. Destacaram-se na definição das classes, entre outros, materiais de construção como alvenarias (blocos de cimento, tijolos e adobe) betão armado, elementos metálicos (chapas de zinco) e madeira. Em termos de altura das edificações foram segregados em 4 grupos, sendo os de 1 piso, de 1-3 pisos, de 4-7 pisos e de 8-19 pisos. Em termos de ductilidade, todas as alvenarias, chapas de zinco, pau-à-pique e algumas estruturas metálicas foram considerados elementos não dúcteis ou com ductilidade desconhecida. Os sistemas de resistência lateral foram considerados alguns dúcteis e outros não dúcteis, dependendo da consistência no detalhamento da armadura e previsão de elementos de reforço para os nós da estrutura. (Tabela 4.6).

Dado o elevado número de classes e os materiais de construção do relatório do censo, foi necessário o agrupamento de classes. Assim, as alvenarias não reforçadas de tijolo e blocos de cimento foram associados com os elementos em betão armado (porticados ou não). Os elementos em adobe e chapas de zinco foram associados, por serem típicas nas zonas rurais, as pranchas de madeira maciça foram mantidas numa única classe. Os materiais em pedra revestida e não revestida foram mantidos numa única classe. As novas classes foram de seguida combinadas com os elementos constituintes dos pavimentos com base em várias opções. Por exemplo, para o caso dos edifícios de pedra revestidas e não revestida foi adotada (90%) MUR+STDRE/HBET:1,2 + (10%) MUR+STRUB/HBET:1,2, na combinação com pisos/pavimentos de cimento (Tabela 4.7). Não existem estudos prévios sobre uma estimativa da combinação das classes dos edifícios. Portanto, para a obtenção das classes foram consideradas algumas premissas e suposições apresentadas por *experts* no desenvolvimento do modelo de exposição para alguns países da América Latina (Yepes *et al.*, 2016).

Tabela 4.5 - Tipos de construção predominantes em Angola (Fonte: autor)

Tipo de edificação	Descrição	Ilustração
Casas de chapas	Constituídas por pavimentos em terra batida ou cimento, paredes e coberturas em chapas de zinco fixadas em pilares e vigas metálicas (tubos vazados) e de madeira. Tem apenas um pavimento. A resistência lateral (SRCL) é garantida pelas paredes de chapas de zinco. Entretanto, a tipologia de construção não possui massa suficiente capaz de introduzir modos de vibração ao edifício. Estão maioritariamente localizadas nas zonas periurbanas e rurais.	
Casas de abobes; pau-a-pique e de blocos de cimento não confinados	As paredes são compostas de panos de adobe, de paus e preenchidas com terra, blocos de cimento. Não possuem pilares nem vigas para o confinamento das alvenarias. A cobertura é de chapa de zinco, cerâmica (losalite) ou de capim. A resistência lateral é garantida pelas paredes. Igualmente as não possuem massas horizontais suficientes para introduzir modos de vibração.	
Casas de alvenaria confinada de blocos de cimento ou tijolos	De alvenaria confinada (AC) feitas com blocos vazados de cimento ou de tijolo, constituídas por 1 ou mais pavimentos de betão armado. As paredes são confinadas por intermédio de vigas e pilares de betão armado. O sistema de resistência lateral é garantido pelos sistemas de pilares e vigas. Prevê-se uma resposta sísmica de baixo à médio desempenho.	
Edifícios de betão armado, metálicos e/ou estruturas mistas	Construídos com betão armado, estrutura metálica ou mista. Existem principalmente nos centros urbanos e compreendem várias unidades habitacionais. Têm entre 2 e 10 pisos em algumas províncias do interior e entre 4 e 25 na capital do país, Luanda. O sistema de resistência lateral é constituído por pilares, vigas e paredes resistentes e noutros casos apenas paredes resistentes, ligados por lajes betonadas in situ ou pré-fabricadas. São dimensionados com base na regulamentação existente e em muitos casos não foram consideradas as acções sísmicas nos modelos numéricos, pela suposta baixa perigosidade sísmica. Geralmente têm boa resposta à acção sísmica.	

Quanto ao tipo de habitação, em função dos dados do censo (tabelas 4.2), as moradias foram divididas em casas/cabanas, apartamentos, anexos ou compartimentos desagregados e casas improvisadas. Em várias opções, foram feitas combinações dos sistemas de resistência lateral com os principais de moradias referidas. Por exemplo, para as casas/cabanas para opção 1, foi assumido 40%MCF+CBH+MOC/LPB+DNO,H:1 (60%) MUR+CBH (Tabela 4.8).

Após a definição das classes foram estimados os números de pisos e a média de moradias por cada piso, factor que permitiu, por fim, a determinação do número de edifícios e a estimativa do valor económico (custos de reposição) do parque residencial edificado. Assim, para edifícios classificados com base no atributo número de pisos (H:1) foi considerado apenas 1 pavimento com apenas 1 apartamento/moradia. A classe com H:1,3 foi considerado um valor médio de 1,5 pisos e 2 apartamentos/moradias por piso, para casos de edifícios de alvenaria com ductilidade desconhecida (Tabela 4.9). O valor médio de pisos em função da altura foi estimado por especialistas durante os encontros desenvolvidos para o caso dos países da América Latina. Para o caso do presente estudo, foi feita uma ligeira adaptação no valor médio de pisos para as classes de altura e número de apartamentos/moradias por piso de acordo com a realidade Angolana.

Com base na metodologia adotada foi determinado o número de edifícios, com base na expressão abaixo, sendo a razão entre o número de moradias (extraídos do censo) pelo produto do número de moradias por piso e número de pisos por edifício (Tabela 4.10).

$$N_{edifícios} = \frac{N_{moradias}}{\frac{N_{moradias}}{piso} \times \frac{N_{pisos}}{edifício}} \quad (4.1)$$

Tabela 4.6 - Classes estrutural dos edifícios em função do sistema de resistência lateral (Fonte: autor)

Taxonomia (GEM)	Tipo de Edifício	Qualidade de construção
CR/LWAL+DUC/HBET:1,3	SRL de paredes de BA, dúctil, entre 1 e 3 pisos	Média
CR/LDUAL+DUC/HBET:4,7	SRL em parede dupla de BA, dúctil, entre 4-7 pisos	Alta
CR/LDUAL+DUC/HBET:8,19	SRL em parede dupla de BA, dúctil entre 8-19 pisos	Alta
CR/LFINF+DUC/HBET:1,3	Pórtico com AE, dúctil, entre 1-3 pisos	Alta
CR/LFINF+DNO/HBET:1,3	Pórtico com AE, não dúctil, entre 1-3 pisos	Média
CR/LFINF/HBET:1,3	Pórtico com AE, duct. desconhecida, entre 1-3 pisos	Média
CR/LFINF+DUC/HBET:4,7	Pórtico com AE, dúctil, entre 4-7 pisos	Alta
CR/LFLS+DNO/HBET:1,3	Lajes planas ou de cogumelos, não dúctil, entre 1-3 pisos	Média
CR/LFLS+DUC/HBET:1,3	Lajes planas ou de cogumelos, dúctil, entre 1-3 pisos	Alta
CR/LFLS/HBET:1,3	Lajes planas ou de cogumelos, duct. desconhecida, entre 1-3 pisos	Média
CR/LFM+DUC/HBET:1,3	Pórtico (Momento resistente), dúctil, entre 1-3 pisos	Alta
CR/LFM+DUC/HBET:4,7	Pórtico (Momento resistente), não dúctil, entre 1-3 pisos	Média
CR/LWAL+DNO/HBET:1,3	SRL em parede de BA, não dúctil, entre 1-3 pisos	Média
CR/LWAL+DNO/HBET:4,7	SRL em parede de BA, não dúctil, entre 4-7 pisos	Média
CR/LWAL+DUC/HBET:1,3	SRL em parede de BA, dúctil, entre 1-3 pisos	Alta
CR/LWAL+DUC/HBET:4,7	SRL em parede de BA, dúctil, entre 4-7 pisos	Alta
CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	SRL em parede de BA, dúctil, entre 8-19 pisos	Alta
MUR+ADO	Alvenaria de adobe não reforçado	Baixa
MUR+CBH,H:1	Alvenaria não reforçada de blocos de cimento entre 1 piso	Baixa
MUR+CBH,H:1,3	Alvenaria não reforçada de blocos de cimento entre 1-3 pisos	
MCF+CBH+MOC/LPB+DNO; H:1	Alvenaria confinada, ductilidade não conhecida, 1 piso	Baixa
MCF+CBH+MOC/LPB+DNO; H:1,3	Alvenaria confinada, ductilidade não conhecida, 1-3 pisos	Baixa
MCF+CBH+MOC/LPB+DNO/HBET:2,3	Alvenaria de bloco de cimento confinada, ductilidade não conhecida	Média
MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1	Alvenaria de bloco de tijolo confinada, ductilidade não conhecida,	Média
MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1,3	Alvenaria de bloco de tijolo confinada, ductilidade não conhecida,	Média
S+SR/LFM+DUC/HBET:1,3	SRL Aço (Moment Frame), dúctil entre 1-3 pisos	Alta
S+SR/LFM+DUC/HBET:4,7	SRL Aço (Moment Frame), dúctil entre 4-7 pisos	Alta
S+SR/LFM+DUC/HBET:8,19	SRL Aço, (Moment Frame) dúctil entre 8-19 pisos	Alta
W+WS/HBET:1	Madeira maciça entre 1 piso	Baixa
W+WS/HBET:1,2	Madeira maciça entre 1-2 pisos	Baixa
UNK	Tipologia desconhecida	Baixa
ME+MEO	Metálicas (chapas metálicas), sem ductilidade conhecida - 1 piso	Baixa
MATO	Paredes em composta por paus e barradas com terra (pau-à-terra)	Baixa
ME+MEO	Paredes em chapa de zinco	Baixa
MUR+STDRE/HBET:1,2	Alvenaria não reforçada de pedra com revestimentos	Baixa
MUR+STRUB/HBET:1,2	Alvenaria não reforçada de pedra semi-revestida	Baixa

Tabela 4.7 - Esquema para moradias para Angola, combinando o tipo de parede com o material do piso (Fonte: autor)

Material da Parede	Material predominante do pavimento						
	Terra batida	Cimento	Mosaico cerâmico	Adobe	Mármore/granito	Tacos de madeira	Outros
Tijolos, bloco de cimento ou tijolo, parede de betão armado	Opção A3	Opção A1	Opção A2	Opção A3	Opção A2	Opção A3	Opção A3
Adobe	MUR+ADO (80%)	MUR+ADO (10%)	Opção B	Opção B	Opção B	Opção B	MUR+ADO (10%)
Pau-a-pique	MATO (90%)	Opção C	Opção C	Opção C	Opção C	Opção C	MATO (10%)
Chapas de zinco	ME+MEO (90%)	ME+MEO (5%)	ME+MEO (1%)	ME+MEO (1%)	ME+MEO (1%)	ME+MEO (1%)	ME+MEO (1%)
Pedra	Opção D3 - (4%) - MUR+STDRE/HBE T:1,2 (90%) + MUR+STRUB/HBE T:1,2 (10%)	Opção D1 - (50%) - -- MUR+STDRE/HBE :1,2 (90%) + MUR+STRUB/HBE :1,2 (10%)	Opção D2 - (15%) - - MUR+STDRE/HBE :1,2 (90%) + MUR+STRUB/HBE :1,2 (10%)	Opção D3 - (1%) - MUR+STDRE/HBE T:1,2 (90%) + MUR+STRUB/HBE :1,2 (10%)	Opção D2 - (15%) - MUR+STDRE/HBE :1,2 (90%) + MUR+STRUB/HBE :1,2 (10%)	Opção D3 - (10%) - MUR+STDRE/HBE T:1,2 (90%) + MUR+STRUB/HBE T:1,2 (10%)	Opção D3 - (5%) - MUR+STDRE/HBE T:1,2 (90%) + MUR+STRUB/HBE T:1,2 (10%)
Pranchas de madeira maciça	Opção E3 (2,5%) W+W/S/HBET:1 (80%) + W+W/S/HBET:1,2 (20%)	Opção E2 (20%) W+W/S/HBET:1 (80%) + W+W/S/HBET:1,2 (20%)	Opção E4 (10%) W+W/S/HBET:1 (80%) + W+W/S/HBET:1,2 (20%)	Opção E3 (2,5%) W+W/S/HBET:1 (80%) + W+W/S/HBET:1,2 (20%)	Opção E4 (10%) W+W/S/HBET:1 (80%) + W+W/S/HBET:1,2 (20%)	Opção E1 (50%) W+W/S/HBET:1 (80%) + W+W/S/HBET:1,2 (20%)	Opção E3 (5%) W+W/S/HBET:1 (80%) + W+W/S/HBET:1,2 (20%)
Outros materiais	Opção F1 - UNK (14,29%)	Opção F1 - UNK (14,29%)	Opção F1 - UNK (14,29%)	Opção F1 - UNK (14,29%)	Opção F1 - UNK (14,29%)	Opção F1 - UNK (14,29%)	Opção F1 - UNK (14,29%)

Tabela 4.8 - Esquema para moradias em Angola, considerando o tipo de parede e pavimento para cada tipo de construção (Fonte: autor)

Tipo de habitação/moradia	Classificação com base no material da parede e do piso					
	Opção A1	Opção A2	Opção A3	Opção B	Opção C1	Opção C2
Casa / cabana	40% MCF+CBH+MOC /LPB+DNO, H:1 (60%) MUR+CBH ;	20% MCF+CBH+MOC/LP B+DNO, H:1; 30% MCF+CBH+MOC/LP B+DNO, H:1,3; 25% MUR+CBH, H:1; MUR+CBH, H:1; 25% MCF+CLBRH+MOC/LO+ DNO/HAPP:1,3	30% MCF+CBH+MOC/LPB+DNO, H: 1,3 70% MUR+CBH, H:1,3	50% MUR+ADO; 50% MUR+STDRE/HBET:1 ,2	70% W+WS/HBET:1; 30% W+WS/HBET:1,2	100% ME+MEO 100% MATO
Apartamentos	25% MCF+CBH+MOC/LP B+DNO, H:1 75% MUR+CBH	10% CR/LWAL+DUC/HB ET:1,3; 50% MCF+CBH+MOC/LP B+DNO, 20% MUR+CBH, H:1; 20% MUR+CBH, H:1,3 5% MUR+CBH, H:1,3; 5% S+SR/LFM+DUC/HBET:4,7; 5% S+SR/LFM+DUC/HBET:8,19	5% CR/LWAL+DUC/HBET:4,7; 10% CR/LWAL+DNO/HBET:1,3; 10% CR/LWAL+DNO/HBET:4,7; 50% CR/LWAL+DUC/HBET:8,19; CR/LWAL+DUC/HBET:1,3; 15%; 5% MUR+CBH, H:1,3; 5% S+SR/LFM+DUC/HBET:4,7; 5% S+SR/LFM+DUC/HBET:8,19	30% MUR+ADO; 70% MUR+STDRE/HBET:1 ,2	30% W+WS/HBET:1; 70% W+WS/HBET:1,2	100% ME+MEO 100% MATO
Anexos / compartimentos desagregados	40% MCF+CBH+MOC/LP B+DNO, H:1 60% MUR+CBH	10% MCF+CBH+MOC/LP B+DNO, H:1; 20% MCF+CBH+MOC/LPB+D NO, H:1,3; 35% MUR+CBH, H:1; 35% MUR+CBH, H:1,3	40% MCF+CBH+MOC/LPB+DNO, H:1 60% MUR+CBH	50% MUR+ADO; 50% MUR+STDRE/HBET:1 ,2	70% W+WS/HBET:1; 30% W+WS/HBET:1,2	100% ME+MEO 100% MATO
Casas improvisadas	100% UNK	100% UNK	100% UNK	100% UNK	100% UNK	100% UNK
Casas em locais de risco	100% UNK	100% UNK	100% UNK	100% UNK	100% UNK	100% UNK

Tabela 4.9 - Número médio de pisos e número de apartamentos por piso (Fonte: autor)

# de pisos	# médio de pisos	Comentários sobre o nº de pisos	Moradias por piso	Comentários sobre o nº de pisos
H:1	1		1	
H:1,2	1,25	80% para um piso e 20% para dois pisos	1	90% de edifícios com 2 pisos têm apenas 1 moradia
H:1,3-A	1,5	Aplicável para pisos de alvenaria confinada, com ductilidade desconhecida, sendo, 50% de 1 piso, 30% de 2 pisos e 20% de 3 pisos	2	50% dos edifícios com 1 piso têm 1 moradia por piso. 30% de 2 pisos têm 2 moradias por piso e 20% de edifícios com 3 pisos têm 2 moradias.
H:1,3-B	2	Aplicável a pisos de betão armado, sendo 20% de 1 piso, 40% de dois pisos e 40% de 3 pisos	3	Todos os pisos têm 3 apartamentos por piso.
H:1,3-C	2,5	Aplicável para edifícios de betão armado CR/LWAL+DUC/HBET, sendo: 50% de 2 pisos e 50% de 3 pisos	4	Todos os pisos têm 4 apartamentos.
H:4,7	5		5	Todos pisos possuem 5 apartamentos em média
H:8,19	13		5	Todos pisos possuem 5 apartamentos em média

4.4.2. ESTIMATIVA DO VALOR ECONÓMICO DAS EDIFICAÇÕES

A distribuição espacial dos edifícios é uma componente fundamental para a determinação do nível de danos num cenário de terramoto, e é considerado um elemento fundamental para a elaboração de planos emergenciais pós-desastres (Silva, *et al.*, 2014). Portanto, o valor económico do edifício é equivalente ao custo de reposição, considerado como valor monetário necessário para construção de um edifício com as mesmas características. O valor de construção depende da localização do edifício e é determinado com base na área de construção multiplicado pelo custo por metro quadrado.

Assim, começou-se por identificar a área média de cada moradia/apartamento para as áreas urbanas e rurais. Foram de seguida separadas por 3 classes de qualidade: alta, média e baixa. A área útil por apartamento/moradia quer na área urbana quer na rural foi estimada com base em algum conhecimento sobre o edificado de Angola. Não existem informações oficiais disponíveis sobre as áreas médias predominantes das moradias em Angola. Ressalta-se a necessidade de aprofundar no levantamento de informações ao nível das instituições oficiais. Sugere-se ainda a realização de encontros/*workshops* com a classe de especialistas, em especial a Ordem dos Arquitectos e dos Engenheiros para a discussão de temas ligados as áreas médias e custos de construção, conforme a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Área de construção de referência por moradia

Qualidade de construção	Área Média do pavimento por moradia (m ²)	
	Urbana	Periurbana/Rural
Alta	120	100
Média	100	80
Baixa	70	60

Após a definição das áreas foram estimados os valores médios de construção por cada moradia, para as zonas urbanas e rurais e para as 3 subcategorias. Os custos foram estimados com base em propostas de empreiteiros para a construção de edifícios residenciais, em especial, de classes diferentes. Em Angola, o valor médio para a construção com qualidade alta ronda os 3.000 USD/m², muito em função do nível de material de acabamentos que são usados. Decidiu-se usar um custo médio para o país inteiro, embora hajam ligeiras diferenças entre as províncias, associadas aos custos de transporte de materiais dos principais portos (no litoral) para as províncias no interior do país. Os dados são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Custo de reposição/reconstrução de referência por unidade de área de construção (Fonte: orçamentos de vários empreiteiros)

Qualidade de construção	Custo médio de reposição por área de construção (USD/m ²)	
	Urbana	Periurbana/Rural
Alta	3 000	300
Média	1 500	200
Baixa	350	100

Com as áreas e custos por unidade de área, foram determinados os valores de reposição de cada apartamento/moradia, multiplicando a área unitária pelo custo unitário para cada classe de qualidade e tipo de áreas como descrito na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Custo de reposição/reconstrução por cada moradia (Fonte: autor)

Qualidade de construção	Custo médio de reposição por moradia (USD/m ²)	
	Urbana	Periurbana/Rural
Alta	360 000	30 000
Média	150 000	16 000
Baixa	24 500	6 000

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o tratamento de todos os dados foi possível a criação de um modelo de exposição para Angola, contendo informações sobre o número de moradias, número de edifícios, o número da população, o

valor económico, calculados com base nos custos de reposição à escala provincial e segregados para as áreas urbanas e rurais.

Constata-se que, com base nos dados do censo populacional, em Angola existem cerca de 5,5 milhões de moradias, com 61% e 39% para as áreas urbana e rural, respetivamente. Este número corresponde a cerca de 2,269 milhões de edifícios, sendo 5% de edifícios para área urbana e 95% para a área rural. Tal disparidade deve-se ao elevado número de moradias que existem na área periurbana/rural serem compostas por 1 único piso. Apresenta-se na Tabela 4.13 o resumo do inventário de edifícios em Angola e na Figura 4.6 a distribuição do stock habitacional pelas áreas urbanas e rurais, com base no censo 2014.

Tabela 4.13 - Resumo do inventário de edifícios de Angola – Fonte (INE, 2016)

Provincial	Número de moradias (milhares)		Número de edifícios (milhares)		Custo de reposição (bilhões de USD)		População (milhares)	
	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Bengo	34,92	50,66	1	51	0,19	0,88	155,77	201
Benguela	300,03	183,58	9	184	1,67	3,18	1 427,99	803,40
Bié	122,52	189,81	4	190	0,68	3,29	628,69	826,57
Cabinda	139,49	27,76	4	28	0,78	0,48	593,89	122,18
C.Cubango	65,04	50,38	2	50	0,36	0,87	304,90	229,10
Cuanza-norte	64,76	37,23	2	37	0,36	0,65	300,36	143,03
Cuanza-sul	154,67	273,09	5	273	0,86	4,73	723,04	1 158,83
Cunene	43,27	144,09	1	144	0,24	2,50	207,16	782,93
Huambo	190,77	243,52	6	244	1,06	4,22	963,20	1 056,35
Huíla	162,74	351,68	5	352	0,91	6,10	817,04	1 680,38
Lunda-Norte	119,83	84,66	4	85	0,67	1,47	539,92	322,65
Lunda-sul	83,20	28,47	3	28	0,46	0,49	424,08	113,51
Malange	107,44	105,78	3	106	0,60	1,83	552,61	433,76
Moxico	85,24	77,87	3	78	0,47	1,35	417,52	341,05
Namibe	60,72	36,31	2	36	0,34	0,63	315,66	179,67
Uíge	110,92	196,21	3	196	0,62	3,40	578,45	904,67
Zaire	98,39	35,49	3	35	0,55	0,62	443,29	151,14
Luanda	1 437,30	47,05	45	47	8,00	0,82	6 760,44	184,95
TOTAL	3 381	2 164	106	2 164	19	38	16 153,99	9 635,04
	61%	39%	5%	95%	33%	67%	63%	37%

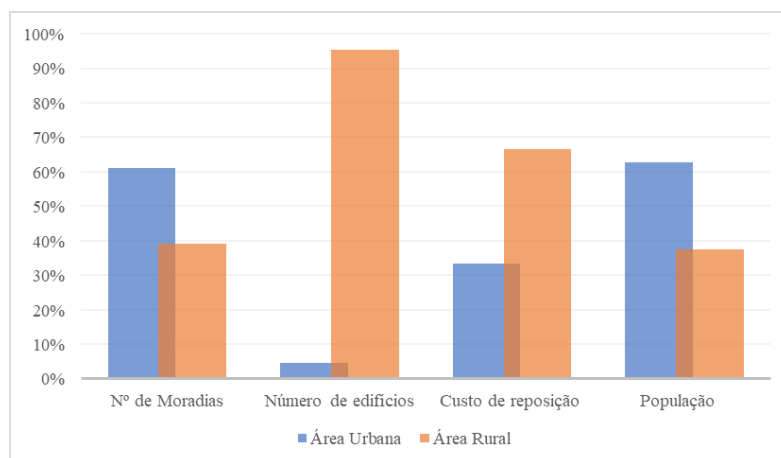


Figura 4.7 - Distribuição do stock habitacional de Angola nas zonas urbana e rural (Autor)

Quanto às províncias, é possível verificar que Luanda tem a maior concentração de moradias seguida da Huíla e Benguela (Fig.4.8), ao passo que a província da Huíla congrega a maior concentração de número de edifícios, pelo peso do elevado número de moradias na área rural, onde predominam moradias com apenas 1 piso (Fig. 4.9).

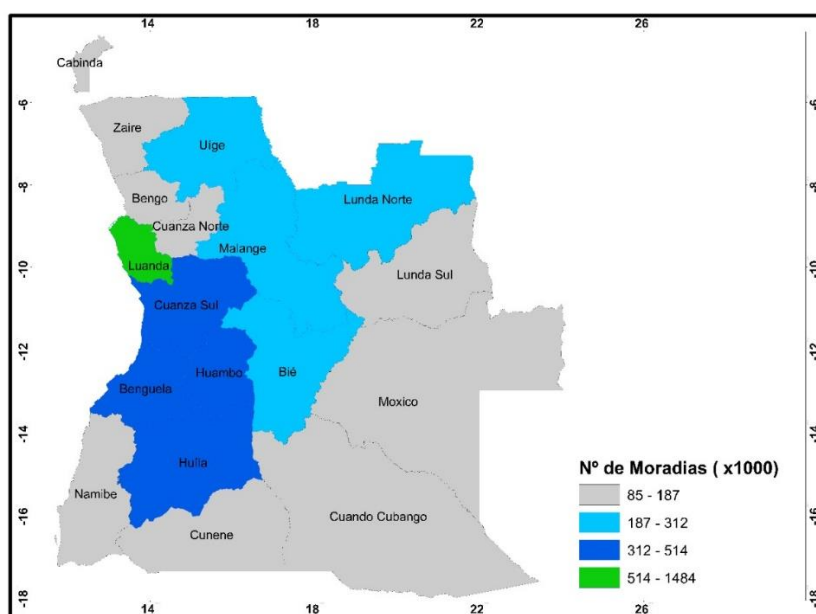


Figura 4.8 - Número de moradias/habitações (milhares) - Fonte: (INE, 2016)

O modelo de exposição indica que a província de Luanda possui o maior número de edifícios na área urbana ao passo que a província da Huíla possui mais edifícios na zona rural. As províncias da Huíla, Benguela, Cuanza-sul e Uíge são as que mais edifícios apresentam, por conta do elevado número de moradias na zona rural, que geralmente são compostas por apenas 1 pavimento. Por outro lado, em termos de frações de edifícios em função da classe estrutural, ao nível do território nacional, cerca de 63% do parque edificado é composto pela tipologia de adobe (ADO), seguidas da classe de alvenarias não reforçadas (MUR) e alvenarias confinadas (MCF). As classes estruturais de edifícios de betão armado representam uma fracção de menos de 5% do parque total edificado do país (Figura 4.10).

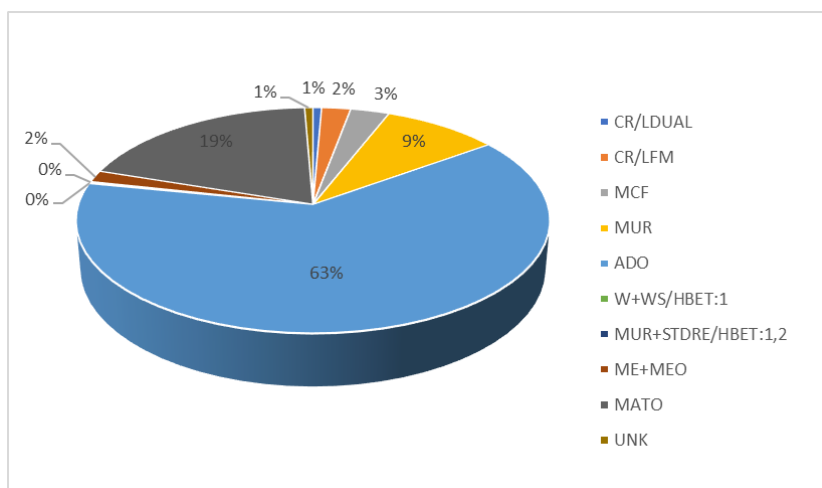


Figura 4.9 - Fracções de moradias na área com base nas classes estruturais dos edifícios (Fonte: autor)

A distribuição geográfica das frações mostra que a província do Huambo congrega a maior fração da classe estrutural ADO, seguidas das províncias da Huíla e Uíge. Já para as classes de betão armado, Luanda apresenta maiores fracções, seguida da província de Benguela. A província do Cunene tem cerca de 72% da classe MATO, composto essencialmente de edifícios de pau-à-pique. A distribuição das fracções por província estão representadas na Figura 4.11.

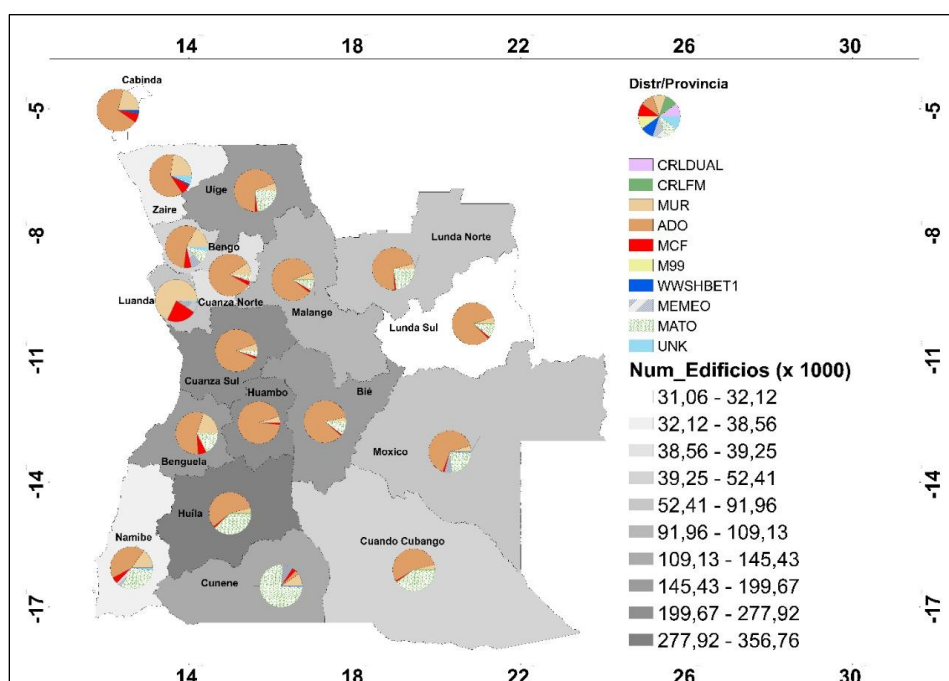


Figura 4.10 - Mapa do stock do parque edificado de Angola, com as classes de edifícios distribuídos por províncias (Fonte: autor)

4.5.1. VALOR ECONÓMICO – DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA

Com base nas tabelas 4.10, 4.11 e 4.12, foi determinado um custo de reposição do parque residencial de Angola avaliado em USD 56,33 bilhões, sendo 33% para a área urbana e 67% para a área rural (Figura. 4.12).

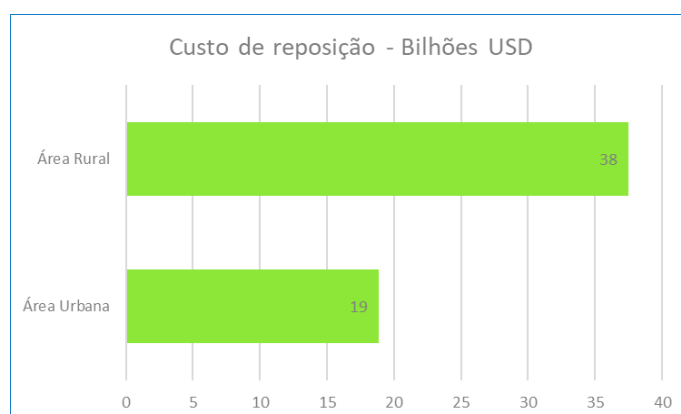


Figura 4.11 - Valor económico distribuído pelas áreas urbana e rural (bilhões de USD) - Fonte: autor

O maior custo de reposição está concentrado na província de Luanda com um total aproximado de USD 8,8 bilhões, seguida das províncias da Huíla, Cuanza-sul e Huambo. A província de Luanda congrega

maior número de edifícios com desenvolvimento em altura e com qualidade de construção alta, facto que faz com que, embora tenha um reduzido número de edifícios em relação às províncias da Huíla e outras, possua um valor mais elevado de custo de reposição (Figura 4.13).

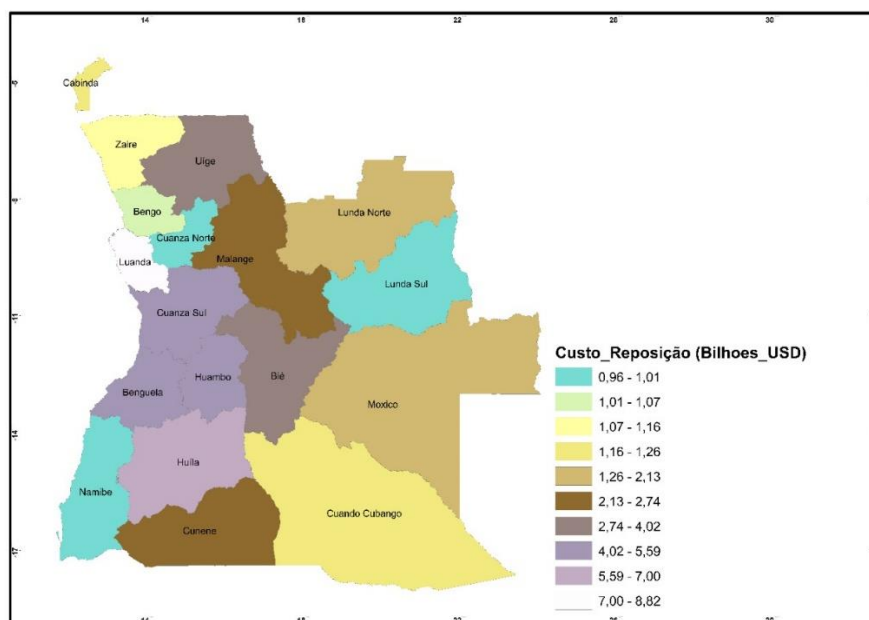


Figura 4.12 – Custo de reposição das construções (bilhões de USD) Fonte: autor

4.5.2. EXPOSIÇÃO DE EDIFÍCIOS À PERIGOSIDADE

Considerando a informação na tabela 4.13, pode-se estimar o número de edifícios expostos à perigosidade sísmica para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. Para o efeito, foi feita uma sobreposição em termos dos números de edifícios, representados pelas principais classes estruturais distribuídas geograficamente, para se aferir qual o potencial grau de danos a causar aos edifícios expostos, em função do tipo de resposta de cada classe estrutural sobre o grau de perigosidade à que se encontrem (Figura 4.10). Assim, é possível verificar-se que, a província com o mais alto valor de perigosidade de 0.11 m/s^2 , e um total de cerca de 80 mil edifícios, sendo que cerca de 64% da classe ADO. Outras preocupações recaem sobre as províncias da Huíla, Benguela e Cuanza-sul, com perigosidades que variam dos 0.05 a 0.07 m/s^2 e que possuem um elevado número de edifícios, com predominância das classes ADO e MUR que apresentam elevados índices de perdas com base nas curvas de vulnerabilidade, detalhadas no próximo capítulo. A província de Luanda que congrega maior fracção de edifícios de betão armado, geometricamente evoluídos em altura, têm uma perigosidade entre os 0.03 e 0.04 , considerada baixa, embora com um número elevado de edifícios, com destaque para a classe MUR com 54% do total do seu parque edificado. Este valor se submetido a um evento sísmico, pela alta fragilidade da maior fracção de classe estrutural, aumenta o grau de eventuais danos à serem causados, pelo fraco desempenho do sistema de resistência lateral da referida classe. Quanto à classe referentes ao betão armado (CR/LDUAL, CR/LFM) e alvenaria confinada (MCF) não apresentam grandes preocupações à perigosidade a que estão expostas.

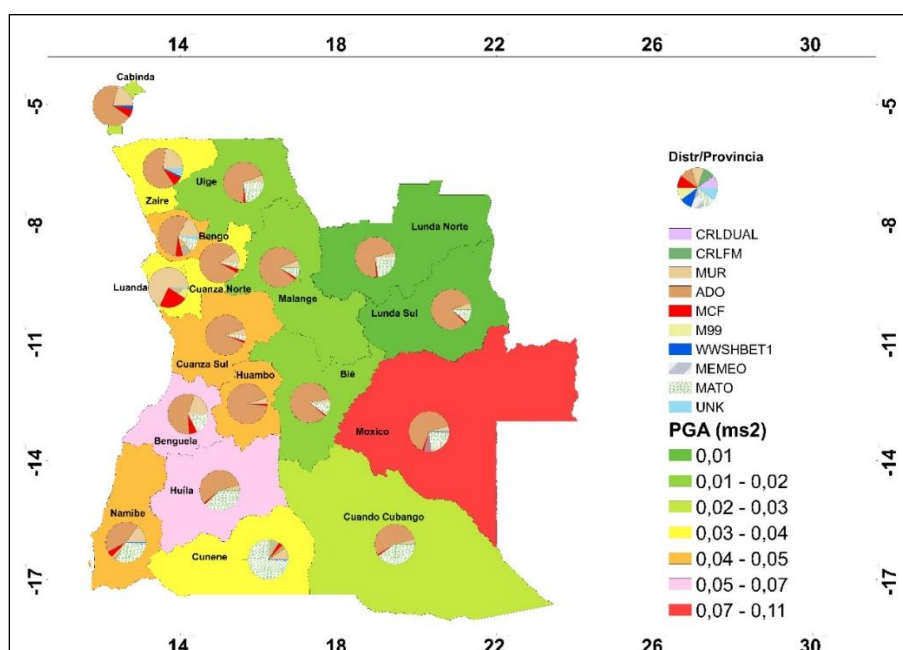


Figura 4.13 - Exposição das frações de edifícios à perigosidade sísmica – Fonte: autor

4.6. LIMITAÇÕES E ASSUNÇÕES

O presente modelo de exposição teve como principal objetivo a criação de uma abordagem preliminar sobre a caracterização do parque edificado de Angola com base nos dados do censo populacional, realizado em 2014. Entretanto, por concentrar o levantamento de dados ao nível da população, o censo não reúne informações exaustivas sobre o parque edificado, limitando-se por apresentar informação sobre os materiais usados na construção de paredes, tectos e pavimentos dos agregados familiares (consideradas moradias). Portanto, não foram consideradas as informações sobre a evolução do parque residencial edificado com base nos sistemas estruturais. Associa-se a este facto a ausência de informação mais aprofundada por especialistas que ajuda a caracterizar o parque edificado. Assim, os futuros leitores e usuários eventuais deste modelo de exposição devem atentar-se ao facto das referidas limitações, associadas quer com a falta de informação quer com alguma eventual insuficiência em termos de qualidade e fiabilidade de alguns dados.

Para a criação do modelo várias assunções foram assumidas. De um modo geral, assumiu-se considerar o método desenvolvido para o modelo de exposição dos países Andinos, com as devidas adaptações na definição das classes dos edifícios, números de moradias/apartamentos por piso, número médio de pisos em função da classe de edificações, com base na realidade e condições do parque edificado de Angola. Acredita-se que o modelo criado representa uma contribuição para os investigadores locais e internacionais em matérias de risco sísmico, pelo que se encontra disponível para futuras verificações e correções para o melhoramento do seu conteúdo.

5

VUNERABILIDADE ESTRUTURAL

5.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo dedicar-se-á no desenvolvimento do modelo de vulnerabilidade das estruturas em Angola. Tal como referido anteriormente, a vulnerabilidade é um parâmetro associado à susceptibilidade das estruturas sofrerem danos ou não em caso de ocorrência de eventos sísmicos (Calvi *et al.*, 2006). Portanto, a sua avaliação final consiste na criação de funções de vulnerabilidade capazes de apresentar o nível de perda (*loss ratio*) em função de uma acção sísmica, medida pela sua aceleração de pico do solo (PGA) ou aceleração espectral da estrutura (S_a), que por sua vez, permitem estimar as respectivas perdas económicas.

5.2. PRÁTICAS DE PROJECTOS EM ANGOLA

Em Angola a prática de projectos de construção é levada à cabo por vários profissionais de várias especialidades, desde Arquitectos, Engenheiros civis, mecânicos, hidráulicos, electrotécnicos, etc. A elaboração de projectos tem obedecido à normalização de países estrangeiros, com destaque para Europa, América e Ásia. No caso particular de projectos de arquitectura, são elaborados com base no Regulamento Geral de Edificações Urbanas (REGEU), aprovado através do Decreto Lei 03/07 de janeiro de 2007, que regula os princípios de concepção arquitectónica de edifícios em Angola. Entretanto, com o término do período de guerra, o país abriu-se às mais variadas partes do globo, tendo permitido a entrada de vários especialistas de nacionalidades distintas, que consigo transportaram projectos de construção implementados no país, desde edificações, infraestruturas, etc. Na maior parte dos casos, os projectos foram elaborados com base na regulamentação dos países de origem, obedecendo à ligeiros pressupostos impostos por Angola e às regras gerais internacionais exigidas.

Quanto aos projectos na especialidade de estruturas, não existem registos sobre existência de normas produzidas pelo país quer para as condições geotécnicas, acções verticais (pesos próprios dos materiais e sobrecargas), horizontais (ventos e sismos), da neve, etc. Assim, os projectos têm sido sempre elaborados com base nas normas dos países de origem das empresas especializadas contratadas para o

feito. Ainda, muitas empresas de direito angolano especializadas na elaboração de projectos de estrutura consideram, na maior parte dos casos, as normas portuguesas, dentre as quais, destacam-se o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçadas – REBAP e o Regulamento de Segurança e Acções – RSA. Com o passar do tempo foram sendo usados os Eurocódigos, com destaque para informação contida nos Anexos Nacional de Portugal (NA).

Foi criada no ano de 2018, em substituição da extinta Empresa Nacional de Elaboração de Projectos – ENEP, por intermédio do Decreto Presidencial 90/18 de 09 de Abril, o Instituto Nacional de Obras Públicas, com o objectivo de normalizar e regulamentar as técnicas, supervisionar a qualidade e critério dos projectos de execução das obras de construção civil, bem como ocupar-se da concepção e elaboração dos projectos e fiscalização de obras da administração pública. Neste momento, a organização tem estado a trabalhar no sentido de elaborar o conjunto de normas e regulamentos para elaboração e implementação de projectos em Angola.

5.2.1. REGULAMENTAÇÃO CONSIDERADA NO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS

A concepção e dimensionamento de estruturas de engenharia civil em Angola têm sido realizadas com base nas normas de vários países, dependendo da origem do Projectista, sendo a maioria elaborados com base na regulamentação portuguesa, dado que maior parte das estruturas dos projectos implementados em Angola foram calculados por empresas portuguesas. Outra grande parte de projectos foram elaborados por empresas chinesas, brasileiras e cubanas, obedecendo à toda normalização de estruturas usadas nestes países.

Quanto à consideração de acções sísmicas nos projectos calculados para Angola, no caso particular de Portugal, segundo relatos de Projectistas de Estruturas, não é comum considerar as acções sísmicas em Angola. Quando são consideradas, usam-se espectros de resposta de cálculo para zonas consideradas com perigosidade sísmica muito baixa, dado que, com base na história da sismicidade de Angola não se tenham registado eventos sísmicos em parques edificados com magnitudes médias a altas. Não são sequer conhecidas perdas humanas nem económicas relevantes.

Dada a ligação histórica entre Angola e Portugal, sem desmerecer as demais normas, destacamos os aspectos relevantes sobre a evolução das normas portuguesas para as acções sísmicas, que se acredita terem sido aplicadas na maior parte do edificado em Angola antes e depois da independência, quando necessário. Assim, em função da história da sismicidade, Portugal é o primeiro país no mundo a elaborar uma norma para fazer face às acções sísmicas. Primeiramente considerou a introdução de articulado sobre a ação sísmica no então Regulamento Geral de Edificações Urbanas (RGEU), em 1951, com detalhes genéricos sem, no entanto, apresentar modos de pormenorização (Costa, 2008). Seguiu-se, no ano 1958, a criação do Regulamento de Segurança das Construções contra os Sismos - RSCCS, para efeitos de dimensionamento de estruturas de engenharia civil face as acções sísmicas, tendo sido considerado o primeiro regulamento, no mundo, para as acções sísmicas. Três anos mais tarde foi aprovado um novo regulamento, por intermédio do Decreto-Lei nº 44041 de 18 de novembro, denominado Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes – RSEP, em 1961, tendo sido, automaticamente, revogada a RSCCS. Dada a contínua evolução das estruturas, é sempre necessária a

actualização constante dos regulamentos. Neste sentido, foi aprovada em 1983 o Regulamento de Segurança e Acções – RSA. Entretanto, o RSEP continuou em vigor até o ano 1985, data em que o RSA passou a ser usado de modo definitivo. No ano 2000 foi elaborado e entrou em uso o Eurocódigo 8 (EC8), dedicado ao dimensionamento das estruturas às acções sísmicas, que tem sido usado até a presente data. A evolução da regulamentação à acção sísmica é apresentada abaixo (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Evolução dos regulamentos sísmicos em Portugal – Fonte: Costa, 2008

Regulamento	Acrónimo	Ano de Homologação
Regulamento Geral das Edificações Urbanas	RGEU	1951
Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos	RSCCS	1958
Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes	RSEP	1961
Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes	RSA	1983
Eurocódigo 8 - Projecto de Estruturas Sismo-resistentes	EC8	2000

5.2.2. CRITÉRIOS ADOTADOS PARA A CONSIDERAÇÃO DA FORÇA SÍSMICA

Existem alguns métodos para a consideração da força sísmica nas estruturas. Dado que as normas portuguesas são tidas como mais utilizadas na concepção de estrutura em Angola, com base nos aspectos atrás narrados e evolução dos regulamentos para acções sísmicas, apresentamos a metodologia considerada pelo Eurocódigo 8 – Projecto Sismo-resistente, para a consideração da acção sísmica nos modelos numéricos elaborados para o cálculo da estrutura face às acções sísmicas.

Sabe-se que, pela experiência, com a análise estática das estruturas é impossível assegurar uma correcta dissipação da energia nas estruturas e uma distribuição de danos equilibrada em edifícios com irregularidades quer em planta como em altura. Assim, é importante considerar um factor de comportamento que permite reduzir a acção sísmica. Este factor é considerado no espectro de resposta elástico e de cálculo da estrutura face a ação sísmica. Segundo (Elnashai & Di Sarno, 2008), para análise estática equivalente, são utilizados espectros de resposta para estimar as forças laterais que actuam no edifício.

5.2.2.1. Zonas sísmicas

As autoridades nacionais de um determinado país devem proceder a delimitação das zonas sísmicas de um determinado território, com base nos graus de perigosidade sísmica, assinalados através das acelerações de pico do solo (PGA). Conforme referido anteriormente, no caso de Angola não existem estudos prévios sobre a classificação oficial de zonas sísmicas. Existem, porém, estudos desenvolvidos há muitos anos com base na história da sismicidade. Portanto, no presente trabalho, foi apresentado um mapa com a indicação dos valores máximos da aceleração de pico dos solos (PGA), para um período de retorno de 475 anos (Figura 3.6) e uma proposta inicial sobre o zoneamento sísmico de Angola com

base no PGA (Figura 3.7). Há, entretanto, a necessidade da sequência do estudo para a criação dos espectros de resposta para a realidade sísmica em Angola.

Para exemplificação, recorrer-se-á ao caso de Portugal para a apresentação do critério para consideração da acção sísmica nos modelos de cálculo estrutural.

O anexo nacional do EC8 prevê dois cenários de zonamento sísmico, nomeadamente um para sismos afastados, ou seja, sismo de interplacas e sismos próximo (intraplaca), conforme Figura 5.1.

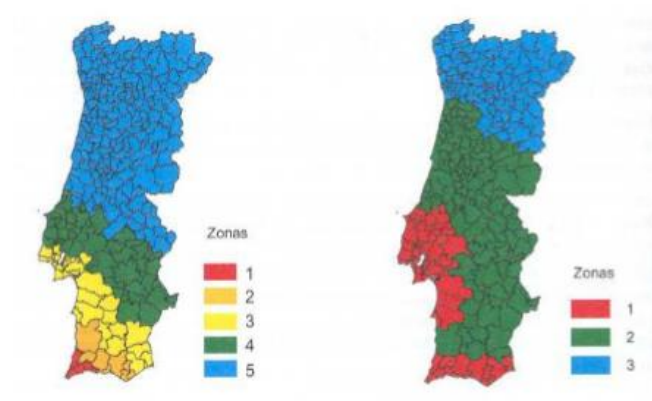


Figura 5.1 - Zonamento sísmico da NP EN 1998-1 para o cenário de sismo afastado/sismo interplacas (à esquerda) e para o cenário de sismo próximo/sismo intraplaca (à direita) (Carvalho, 2007)

5.2.2.2. Espectros de resposta

Actualmente, maior parte dos regulamentos usam os espectros de resposta como ferramenta para representar a acção sísmica em estruturas para efeitos de dimensionamento. Os espectros de respostas considerados nos regulamentos, são curvas idealizadas e, por este facto, não representam na totalidade a acção sísmica fornecida por osciladores. As curvas têm como principal objectivo definir os valores mínimos de resistência a que as estruturas de uma determinada zona devem ser submetidas em função da perigosidade/zonamento sísmico. Existem dois tipos de espectros de resposta, sendo um elástico (Figura 5.2), que é definido em função da sismicidade do local, das características do terreno de fundação e do coeficiente de amortecimento a considerar na estrutura, e o espectro de cálculo que é o elástico afectado por um coeficiente de comportamento da estrutura que depende das condições de ductilidade das estruturas.

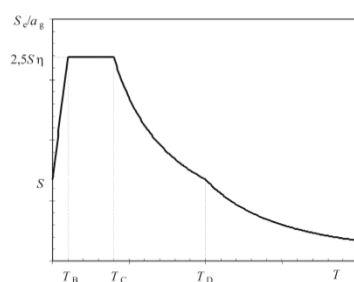


Figura 5.2 - Forma do espectro de resposta elástica – Fonte: EC8 (CEN, 2010)

A função do referido gráfico é definida com base nas seguintes expressões:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (5.1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (5.2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (5.3)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T} \right] \quad (5.4)$$

Onde:

$S_e(T)$ – espectro de resposta elástica

T : período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade;

a_g : valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$);

T_B : limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_C : limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_D : valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante;

S : coeficiente do solo;

η : coeficiente de correção do amortecimento com o valor de referência $\eta=1$ para 5% de amortecimento viscoso da secção.

Os valores de T_B , T_C , T_D e S , quer para sismos do tipo 1 como 2, são definidos abaixo (Tabela 5.2 e 5.3).

Tabela 5.2 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo o espectro de resposta elástica do tipo 1 – adaptado do EC8 (CEN, 2010)

Tipo de terreno	S	TB (s)	TC (s)	TD (s)
A	1,00	0,15	0,40	2,00
B	1,20	0,15	0,50	2,00
C	1,15	0,20	0,60	2,00
D	1,35	0,20	0,80	2,00
E	1,40	0,15	0,50	2,00

Tabela 5.3 - Valores recomendados dos parâmetros descrevendo o espectro de resposta elástica do tipo 2 - adaptado do EC8 (CEN, 2010)

Tipo de terreno	S	TB (s)	TC (s)	TD (s)
A	1,00	0,05	0,25	1,20
B	1,35	0,05	0,25	1,20
C	1,50	0,10	0,25	1,20
D	1,80	0,10	0,30	1,20
E	1,60	0,05	0,25	1,20

Com base nos parâmetros e tipos de solos acima, apresentam-se os espectros de resposta para o sismo do tipo 1 e 2:

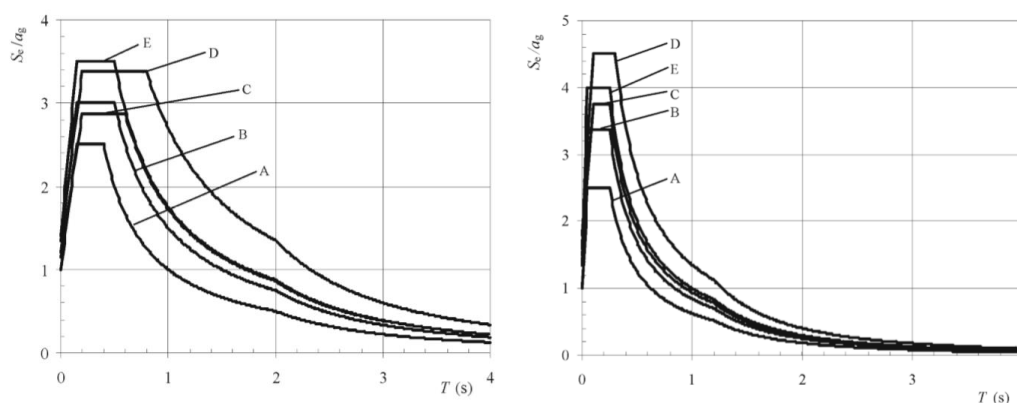


Figura 5.3 - Espectros de resposta elástica para sismo do tipo 1 (à esquerda) e do tipo 2 (à direita).

Para computar o espectro de resposta de cálculo, como referido anteriormente, deve-se afectar os espectros de resposta elástica com o coeficiente de comportamento das estruturas, conforme representação nas expressões abaixo:

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (5.5)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (5.6)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5.7)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5.8)$$

Sendo:

q : coeficiente de comportamento;

β : coeficiente corespondente ao limite inferior do espectro de cálculo horizontal.

5.2.2.3. Combinação da acção sísmica

Em caso da análise sísmica, o regulamento exige que as forças (inércia) relativas às acções horizontais, em especial à sísmica sejam avaliadas com base na expressão:

$$\sum G_{ki} + \sum \Psi_{Ei} \cdot Q_{ki} \quad (5.9)$$

Sendo:

$\Psi_{E,i}$ – coeficiente de combinação da acção variável i , dada pela expressão:

$$\Psi_{Ei} = \varphi \cdot \Psi_{2,i} \quad (5.10)$$

Sendo:

φ : parâmetro que depende do tipo da acção variável a considerar no edifício.

A combinação final de acções é dada pela seguinte expressão:

$$\sum G_{kj} + P + A_{Ed} + \sum \Psi_{Ei} \cdot Q_{ki} \quad (5.11)$$

Sendo:

G_{kj} : valor característico da acção permanente;

P : acção do pré-esforço;

A_{Ed} : valor do projecto da acção sísmica;

Q_{ki} : valor característico da acção variável.

5.3. IRREGULARIDADES ESTRUTURAIS

Na concepção de estruturas nas regiões sísmicas a perigosidade sísmica deve ser levada em consideração nas fases iniciais de projecto. Assim, é importante considerar um conjunto de critérios na concepção arquitectónica dos projectos capaz de originar um sistema estrutural que permita reduzir a severidade de danos em caso de ocorrência de um evento sísmico. Neste sentido, devem ser observados um conjunto de princípios básicos de concepção tais como: (i) a simplicidade estrutural; (ii) uniformidade, simetria e redundância da estrutura; (iii) resistência e rigidez nas duas direcções; (iv) resistência e rigidez à torção; (v) acção de diafragma; e (vi) fundação adequada. O não cumprimento destes princípios origina irregularidades estruturais nos edifícios, que por sua vez, maximizam a severidade no nível de danos em caso de ocorrência de um evento sísmico.

Para efeitos do projecto sismo-resistente, as estruturas podem ser classificadas em regulares e não regulares, sendo as regulares aquelas que cumprem com os critérios básicos de concepção do projecto sismo-resistente e não regulares as que não cumprem. Quanto às irregularidades estruturais, o Eurocódigo 8 (CEN, 2010) classifica as estruturas segundo aspectos horizontais (em planta) e verticais, sendo irregularidades em planta e em altura, respectivamente.

Para que uma estrutura não seja considerada irregular em planta deve obedecer aos critérios definidos no EC8 (CEN, 2010), conforme o texto captado:

4.2.3.2 Critérios de regularidade em planta

- (1) Para que um edifício seja classificado como regular em planta, deve satisfazer todas as condições indicadas nos parágrafos seguintes.
- (2) No que se refere à rigidez lateral e à distribuição de massas, a estrutura do edifício deve ser aproximadamente simétrica em planta em relação a dois eixos ortogonais.
- (3) A configuração em planta deve ser compacta, isto é, deve ser delimitada, em cada piso, por uma linha poligonal convexa. Se existirem recuos em relação a essa linha (ângulos reentrantes ou bordos recuados), poderá considerar-se que existe regularidade em planta se esses recuos não afectarem a rigidez do piso no plano e se, para cada um deles, a área entre o contorno do piso e a linha poligonal convexa que o envolve não é superior a 5 % da área do piso.
- (4) A rigidez dos pisos no plano deve ser suficientemente grande em relação à rigidez lateral dos elementos estruturais verticais, para que a deformação do piso tenha um efeito reduzido na distribuição das forças entre os elementos. Assim, as formas L, C, H, I e X em planta deverão ser cuidadosamente examinadas, em particular no que diz respeito à rigidez dos ramos laterais salientes, que deverá ser comparável à da parte central, de forma a satisfazer a condição de diafragma rígido. Para efeitos do comportamento global do edifício, deverá ser considerada a aplicação deste parágrafo.
- (5) A esbelteza $\lambda = L_{\max}/L_{\min}$ do edifício em planta não deve ser superior a 4, em que $L_{\max}$ e $L_{\min}$ são, respectivamente, a maior e a menor dimensão em planta do edifício, medidas em direcções ortogonais.
- (6) A cada nível e para cada direcção de cálculo x e y , a excentricidade estrutural e_o e o raio de torção r devem verificar as duas condições seguintes, expressas para a direcção de cálculo y :

$$e_{ox} \leq 0,30 \cdot r_x \quad (4.1a)$$

$$r_x \geq l_s \quad (4.1b)$$

A imagem abaixo mostra o exemplo para a verificação do critério da regularidade em planta.

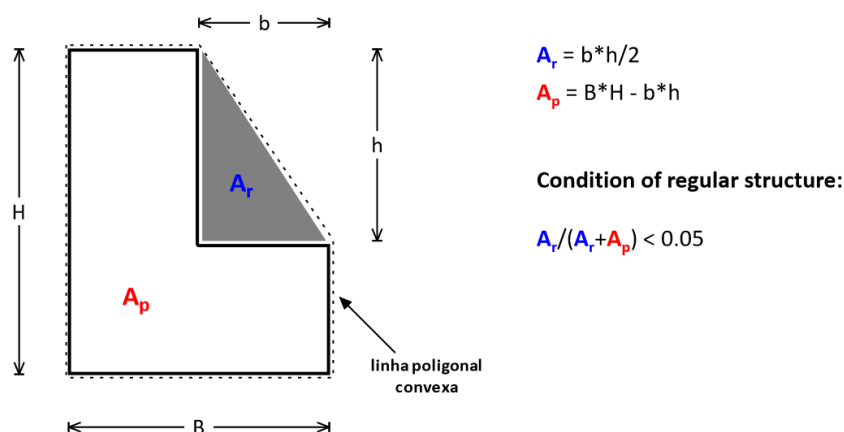


Figura 5.4 - Critério para regularidade em planta. Fonte: Transparências da UC Eng^a Sísmica (2019)

Quanto à irregularidade em altura, várias situações podem ser assinaladas, sendo as mais relevantes aquelas relacionadas com a redução área dos pisos do edifício ao longo da sua altura. Os vários aspectos podem ser verificados na imagem abaixo:

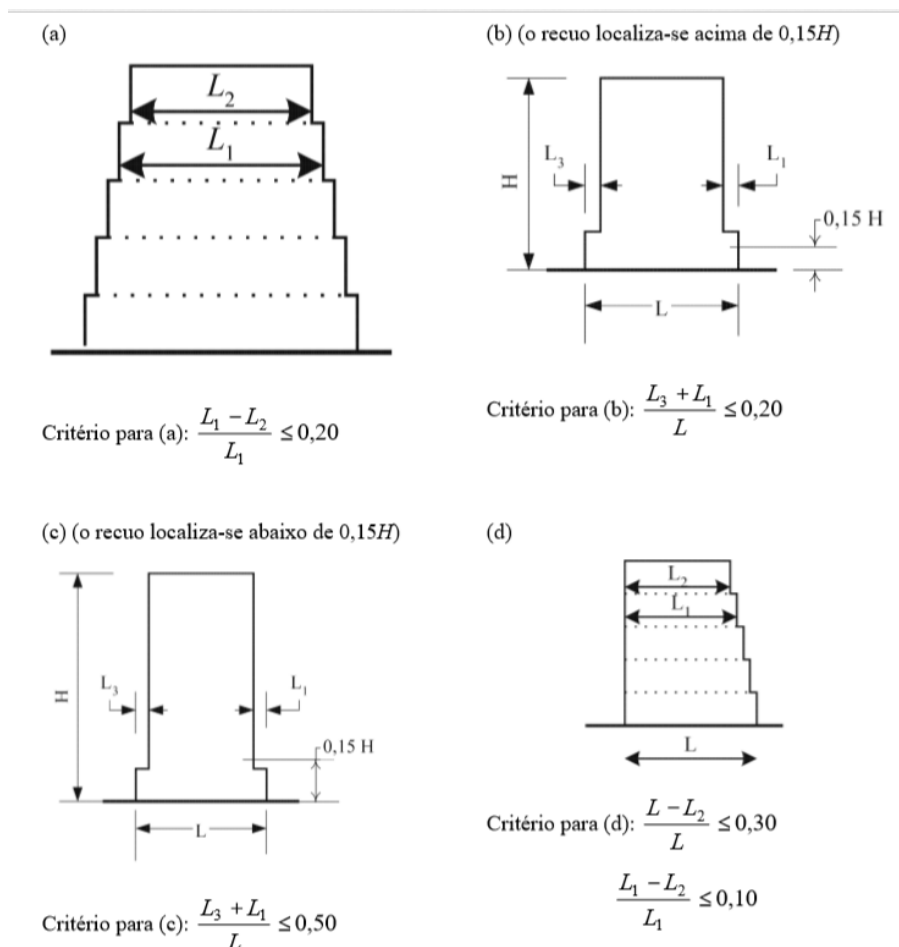


Figura 5.5 - Critérios de regularidade de edifícios com recuo (CEN, 2010)

5.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

Como já referido anteriormente, o principal objectivo da vulnerabilidade é determinar a probabilidade de uma certa estrutura sofrer um determinado nível de dano na ocorrência de algum evento sísmico, (Calvi *et al.*, 2006). Normalmente em países com actividade sísmica intensa são aperfeiçoados os métodos de determinação da vulnerabilidade sísmica, tornando assim o processo mais dispendioso. Já em países com muito baixa actividade sísmica, a aplicação dos métodos mais avançados não se manifesta producente. Os métodos de determinação da vulnerabilidade sísmica podem classificados como qualitativos e quantitativos, de acordo com a Organização Pan-americana da Saúde (Proença, 2004). Podem ainda ser considerados como métodos empíricos e analíticos (Calvi *et al.*, 2006).

Geralmente, os métodos qualitativos são aqueles concebidos para uma avaliação generalizada da vulnerabilidade sísmica de um conjunto de edifícios, destinada à priorização das operações de reforço. Podem ser também utilizados para corroborar o nível de segurança das construções determinado por um método quantitativo. Estes métodos não permitem identificar claramente a distribuição de danos na estrutura, impossibilitando uma avaliação rigorosa dos danos e o desenvolvimento de projeto de reforço

sísmico. São sobretudo úteis numa fase preliminar de verificação, podendo subsequentemente levar à avaliação da vulnerabilidade sísmica estrutural por métodos quantitativos (Miranda, 2013).

Os métodos quantitativos são mais rigorosos e podem ser utilizados quando se pretende estudar detalhadamente uma determinada construção ou quando os métodos qualitativos conduzem a resultados inconclusivos. Estes métodos pressupõem o desenvolvimento de um modelo numérico específico que é utilizado com determinado grau de rigor para a previsão do comportamento sísmico (Miranda, 2013).

5.4.1. MÉTODOS QUALITATIVOS OU EMPÍRICOS

Entre os principais métodos de qualitativos ou empíricos, destacam-se os seguintes:

- Matrizes de Probabilidade de Danos (*Damage Probability Damage – DPM*);
- Método do Índice de Probabilidade (*Vulnerability Index Method*);
- Curvas Contínuas de Vulnerabilidade (*Continuos Vulnerability Curves*); e
- Método de Verificação (*Screening Method*).

O Método de Probabilidades de Danos é bastante usado na Europa. Consiste na determinação da probabilidade de danos com base em dados de danos colhidos em cenários pós-sismos, e enuncia que edifícios de uma determinada classe estrutural têm a mesma probabilidade de sofrer iguais danos. O método tem vantagens por permitir prever o efeito dos eventos sísmicos à determinadas intensidades em edifícios com a mesma classe estrutural de uma determinada região; tem como desvantagem por não permitir o conhecimento do comportamento sísmico e nível de danos em caso de ocorrência de sismos de magnitudes mais elevadas dos que já ocorridos. O referido método foi abordado nos trabalhos de (Whitman *et al.*, 1973), (Braga *et al.*, 1982), (Dolce *et al.*, 2003), (Giovinazzi e Lagomarsino, 2001 e 2004). Nos trabalhos de (Fah *et al.*, 2001), (Cardona e Yamin, 1997), (Veneziano *et al.*, 2002), (Oliveira *et al.*, 2004 e 2005) e (Lantada *et al.*, 2004).

O Método de Índice de Vulnerabilidade foi originalmente desenvolvido na Itália pelo *National Group for the Defence Against Earthquakes* (GNDT-SSN, 1994) para determinação da vulnerabilidade sísmica através da observação e catalogação sísmica de danos e mecanismos após a ocorrência de um evento sísmico. Este método tem sido recorrentemente abordado em vários estudos e autores, entre os quais, destacam-se (Guagenti & Petrini, 1989), (Calvi *et al.*, 2006), (Lagomarsino e Giovinazzi, 2006), (Athmani *et al.*, 2014). O método consiste determinação de um índice de vulnerabilidade (I_v), calculado para cada edifício através de uma média ponderada de 14 parâmetros distribuídos em 4 classes de vulnerabilidade crescente. Cada parâmetro tem associado um peso (p_i) definido em função do grau de importância do referido parâmetro para o comportamento sísmico. O método foi apresentado com detalhe, conforme (Tabela 5.4) abaixo (Vicente, 2008). Entretanto, a principal fonte de incerteza da metodologia reside na definição dos pesos (p_i) relativo à cada parâmetro definido. Mas, segundo o trabalho desenvolvido por (Vicente, 2008), caso a inspecção aos edifícios seja feita com elevado nível de detalhe, reduz-se consideravelmente a incerteza associada ao método.

Tabela 5.4 - Formulação da metodologia do índice de vulnerabilidade (Vicente, 2008).

Parâmetros		Classe C_{vi}				Peso	Peso relativo
		A	B	C	D	p_i	
Grupo 1. Sistema construtivo							
P1	Tipo de sistema resistente	0	5	20	50	0,75	46/100
P2	Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1,00	
P3	Resistência convencional	0	5	20	50	1,50	
P4	Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0,50	
P5	Número de pisos	0	5	20	50	1.50	
P6	Fundações e tipo de solo	0	5	20	50	0.75	
Grupo 2. Irregularidades e interações							
P7	Posição e interação no agregado	0	5	20	50	1,50	27/100
P8	Configuração em planta	0	5	20	50	0,75	
P9	Regularidade em altura	0	5	20	50	0.75	
Grupo 3. Pavimentos e cobertura							
P10	Alinhamento de aberturas	0	5	20	50	0,50	15/100
P11	Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1,00	
P12	Sistema de cobertura	0	5	20	50	1,00	
Grupo 4. Estado de conservação e outros elementos							
P13	Patologias e estado de conservação	0	5	20	50	1,00	12/100
P14	Elementos não estruturais	0	5	20	50	0.50	

O método das curvas contínuas de vulnerabilidade consiste em traçar curvas a partir dos danos observados nas edificações em função dos eventos sísmicos passados. O método foi abordado nos trabalhos de (Spence *et al.*, 1992), (Orsini, 1999), (Sabetta *et al.*, 1998), (Rosseto e Elnashai, 2003), (Scawthorn *et al.*, 1981) e (Shinozuka *et al.*, 1997). Para traçar as curvas foi desenvolvida uma Escala de Intensidade sem Parâmetros (*Parameterless Scale Intensity* – PSI), baseada em danos observados em sismos anteriores pela escala de intensidade MSK (Spence *et al.*, 1992).

Entre os Métodos de Verificação destacam-se 3 tais como o *Japan Building Disaster Prevention Association* - JBDPA, o *Rapid Screening Procedure* - RSP e o Método de Verificação da Segurança Sísmica (*Seismic Safety Screening Method* - SSSM).

O método japonês (JBDPA) compara o índice de desempenho sísmico (I_s) com o índice de solicitação sísmica (I_{s0}). Foi desenvolvido com base na metodologia criada por Hirosawa (Hirosawa, 1992). Já o RSP gera uma pontuação estrutural “S” que está, directamente, relacionada com a probabilidade de o edifício apresentar danos capazes de gerar risco de vida face às acções sísmicas fortes. Por fim, SSSM é uma adaptação do método japonês (JBDPA) às características construtivas e sísmicas da Turquia. Todos métodos apresentam uma desvantagem comum que se prende na necessidade de adequar os índices, coeficientes e factores à realidade do local em estudo (Miranda, 2013).

5.4.2. MÉTODOS QUANTITATIVOS OU ANALÍTICOS

São apontados como métodos quantitativos ou analíticos para a determinação da vulnerabilidade sísmica os Métodos Híbridos, que se baseiam em Espetros de Capacidade (*Capacity Spectrum Method* – CSM) e em métodos baseados em Deslocamentos (*Fully Displacement Methods*). São métodos que apresentam

um nível de detalhamento mais exaustivo e, com isso, resultados mais sólidos que, por sua vez, permitem uma análise de sensibilidade e a calibração de vários parâmetros que fazem parte dos procedimentos (Calvi *et al.*, 2006). Os métodos híbridos podem solucionar modelos matemáticos com base em quatro metodologias de análise estrutura a saber: análise estática linear, análise estática não-linear (*pushover*), análise dinâmica linear e análise dinâmica não linear (Proença, 2004).

Todos métodos que se baseiam em espectros de capacidade procuram um determinado ponto de desempenho sísmico de cada tipo ou classe de edifício para uma determinada acção sísmica, a partir da intersecção das curvas de capacidade da estrutura com as curvas da acção sísmica. Os seus fundamentos encontram-se descritos no ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* (ATC-40, 1996) precisamente, na secção 8 sobre procedimentos de análises estáticas não lineares. É um método que tem sido bastante usado em vários estudos e metodologias desenvolvidas ao nível do mundo, como por exemplo por Kappos (Kappos *et al.*, 1995, 1998) e Barbat (Barbat *et al.*, 1996). O método do espectro de capacidade tem servido de base para o desenvolvimento de várias metodologias para a determinação do risco sísmico. Algumas destas metodologias são HAZUS (Hazard US), Haz-Taiwan, LNECloss e o projeto RISK_UE.

Estes métodos combinam as Matrizes de Probabilidade de Danos e as Funções de Vulnerabilidade que se baseiam em estatísticas de danos pós-terramotos com os procedimentos numéricos que têm como base os modelos matemáticos das tipologias das edificações em estudo. Modelos híbridos podem ser particularmente vantajosos quando há escassez de dados de danos pós-terramotos de um determinado nível de intensidade para a área geográfica analisada, na medida em que as simulações matemáticas permitem, através da extrapolação de resultados, preencher as lacunas existentes nas Matrizes e Funções. Importante observar também que os dados pós-terramotos disponíveis para determinados níveis de intensidade permitem a calibração do modelo matemático (Miranda, 2013).

5.4.3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os métodos experimentais consistem na avaliação da vulnerabilidade das estruturas com base em modelos reais construídos para o efeito. Os seus resultados são de grande valia por permitirem a calibração de modelos matemáticos usados para o mesmo fim. Estes métodos apresentam uma desvantagem por apresentarem um custo muito elevado para sua realização. Um caso concreto da sua aplicação remete ao trabalho desenvolvido por Varum (Varum *et al.*, 2004) e consistia na utilização do método para a determinação da vulnerabilidade sísmica de edifício de betão armado existente, usando um modelo composto por dois pórticos em escala real. Cada pórtico era composto por quatro pavimentos construídos, assumindo as práticas de projecto utilizadas nos anos 50 e 70, sendo que apenas um dos pórticos possuía panos de alvenaria de preenchimento. Foram realizados vários ensaios, por intermédio de cargas laterais aplicadas sobre os mesmos através de acelerações entre 218 e 373 cm/s².

Um outro método experimental foi proposto por Michel e Guéguen (Michel & Guéguen, 2004), denominado método de vibração ambiente. A sua implementação é mais barata do que outros métodos experimentais e é o mais indicado para as regiões com sismicidade mais baixas. O método consiste na implementação de uma fonte excitadora de vibração, e através da instrumentação é obtida a resposta da

estrutura que permite estimar o funcionamento sísmico das estruturas existentes na região a uma determinada acção sísmica. O método, entretanto, apresenta a desvantagem pelo facto de a vibração resultante da fonte excitadora ser de muito baixo nível e assim não conseguir reproduzir o comportamento das estruturas em cenários sísmicos reais (Miranda, 2013).

5.5. MODELO DE VULNERABILIDADE DE ANGOLA

Com base no modelo de exposição desenvolvido, onde foram definidas as principais classes de edificações em Angola com base no comportamento estrutural face às acções sísmicas, e dado que não existem estudos prévios sobre o levantamento estrutural de edifícios e suas respectivas curvas de fragilidade e vulnerabilidade, recorreu-se à base de dados providenciadas pelo GEM, para a escolha das curvas de fragilidade das classes de edifícios de países/regiões com semelhanças nos aspectos de construção com o parque edificado de Angola. Por outro, considerando que existem várias classes, dentre as quais algumas com bastante semelhança no comportamento estrutural face à acção sísmica, foram reduzidas para apenas 5 classes, que permitiram a subsequente escolha das funções/curvas de vulnerabilidade disponíveis na base de dados da GEM, tendo como pressuposto o tipo de estrutura e o valor da aceleração de pico do solo (PGA) ou a aceleração espectral da estrutura (S_a).

5.5.1. CURVAS DE FRAGILIDADE

Não existem referências na bibliografia sobre estudos realizados para a determinação das curvas de fragilidade das classes de edifícios em Angola. Como referido no capítulo anterior, a definição das classes de edificações foi feita com base em algumas classes existentes em países da América Latina, assumindo algumas semelhanças nalgumas características com o edificado em Angola. Assim, na base de dados da Plataforma *OpenQuake* (<https://platform.openquake.org/fragility>) foram escolhidas todas as curvas de fragilidade correspondentes à cada classe de edificações, definidas no modelo de exposição (Tabela 4.6).

As curvas correspondentes à muitas classes de edifícios de betão armado com paredes resistentes e ductilidade conhecida ou não, como por exemplo CR/LFM+DUC/HBET:4,7, CR/LWAL+DUC, foram escolhidas com base no trabalho desenvolvido por Martinez e Gustavo (Martinez & Gustavo, 2012). Segundo o estudo, para estimar o desvio padrão supõe-se que para cada deslocamento espectral, o dano se distribui de forma binomial e assim, se obtêm as probabilidades dos outros estados de danos. Logo, a partir da análise de erro quadrático típico se determinam os desvios padrão para cada tipo de dano. Uma das curvas que representa esta classe pode apresentar-se na Figura 5.6. Para as alvenarias confinadas, dentre as quais indicamos (MCF+CBH+MOC/LPB+DNO, MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1, as curvas de fragilidade foram selecionadas com base nos trabalhos desenvolvidos por Villar-Vega (Villar-Vega, 2014) aplicáveis para países como Equador, Colômbia, etc, conforme Figura 5.7.

Assumiu-se que as alvenarias não reforçadas têm um comportamento similar a alvenaria de adobe. Assim, foi considerada classe MUR+ADO, cuja curva de fragilidade foi escolhida com base no estudo

desenvolvido por Villar-Vega (Villar-Vega, 2014), Figura 5.8. Já para as estruturas de madeira, assumimos os edifícios de madeira sólida. Para esta classe foi usada a curva de fragilidade desenvolvida por Liao, para a determinação da fragilidade dos edifícios em Taiwan face às acções sísmicas (Liao *et al*, 2006), onde o valor médio da curva de fragilidade de cada edifício é baseado em edifícios protótipos e com base no julgamento da engenharia (Figura 5.9). Por fim, as estruturas dos edifícios de pau-à-pique, chapas, e aquelas na categoria de desconhecidos (ME+MEO, MATO, MUR+STDRE/HBET:1,2; UNK) foram agrupados para uma única classe, tendo sido atribuída a curva de fragilidade para classes desconhecidas (UNK), desenvolvida por Villar-Vega (Villar-Vega, 2014), conforme a Figura. 5.8.

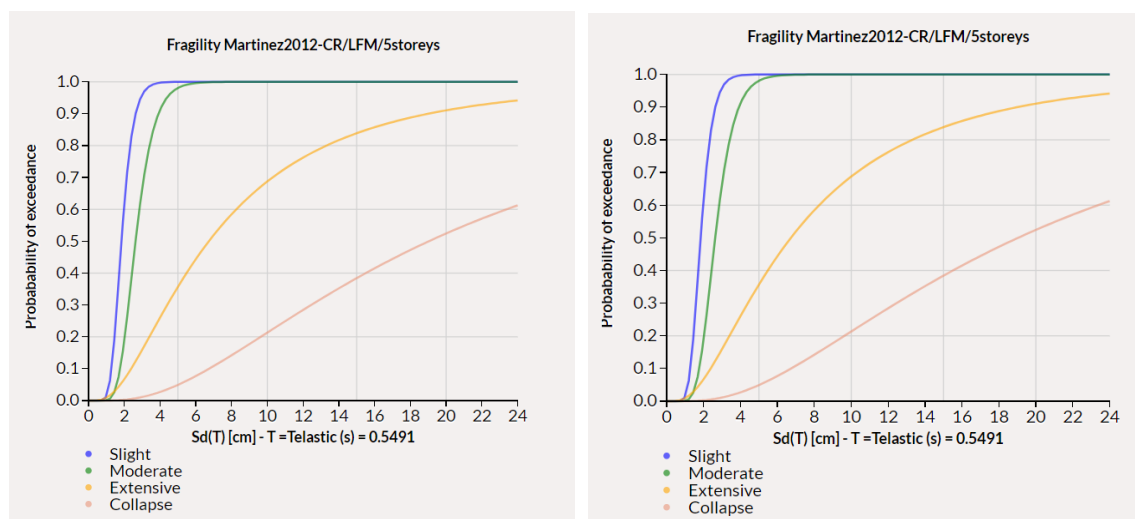


Figura 5.6 - curvas de fragilidade adaptadas para as classes CR/LFM+DUC/HBET:4,7 (à esquerda) e CR/LWAL+DUC (à direita). (Martinez & Gustavo, 2012).

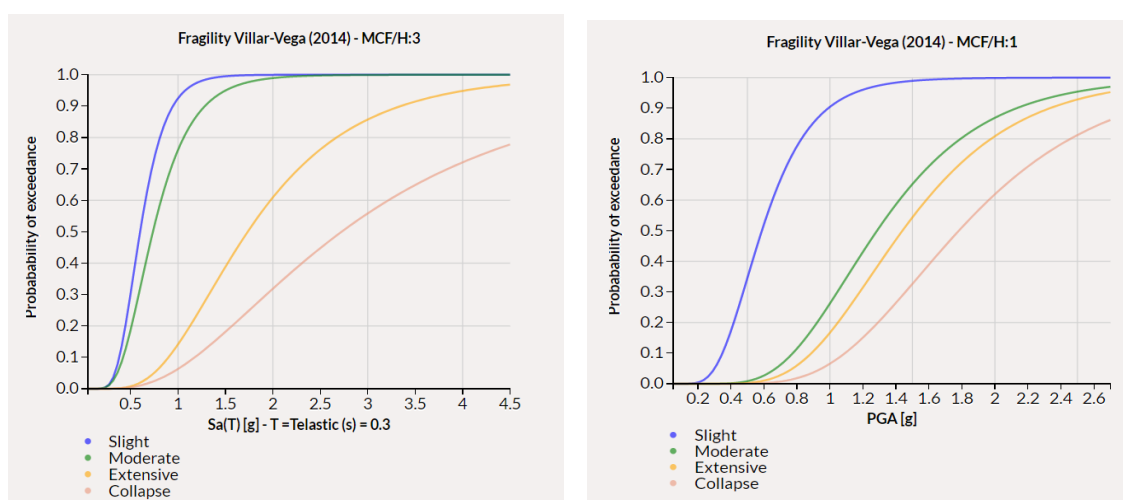


Figura 5.7 - curvas de fragilidade adaptadas para as classes MCF+CBH+MOC/LPB+DNO (à esquerda) e MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1 (à direita). (Villar-Vega, 2014)

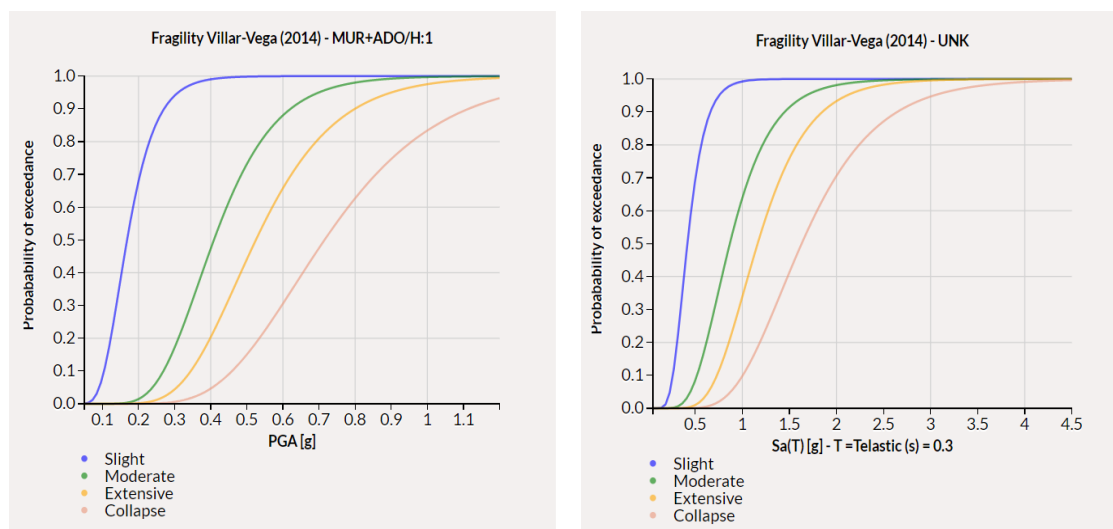


Figura 5.8 - Curvas de fragilidade adaptadas para as classes MUR+ADO (à esquerda) e ME+MEO, MATO, MUR+STDRE/HBET:1,2; UNK (à direita). (Villar-Vega, 2014)

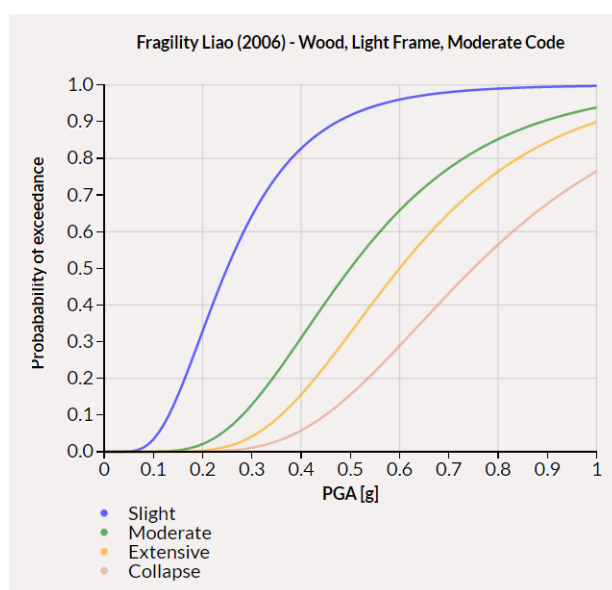


Figura 5.9 - curvas de fragilidade adaptadas para as classes W+WS/HBET:1. (Liao et al, 2006).

Tabela 5.5 - Curvas de fragilidade das classes de edifícios. Fonte: OpenQuake
<https://platform.openquake.org/fragility>

Nível de dano	IML	Frac/leve		Moderado		Severo		Colapso		Classe e Fonte na base de dados da GEM
Classe de edifícios		μ (g)	σ (g)	μ (g)	σ (g)	μ (g)	σ (g)	μ (g)	σ (g)	
CR/LWAL+DUC/HBET:1,3	Sd (0,1188)	0.201	0.068	0.301	0.119	1.551	2.001	4.428	4.867	Fragility Martinez2012-CR/LWAL/2storeys
CR/LDUAL+DUC/HBET:4,7	PGA	0.147	0.099	0.465	0.39	1.057	0.811	2.707	1.854	Hancilar et. al (2014) - CR/LDUAL school - Case III (PGA)
CR/LDUAL+DUC/HBET:8,19	PGA	0.147	0.099	0.465	0.39	1.057	0.811	2.707	1.854	Hancilar et. al (2014) - CR/LDUAL school - Case III (PGA)
CR/LFINF+DUC/HBET:1,3	PGA	0.451	0.082	0.878	0.159	2.208	0.401	5.121	0.929	Rojas(2010) - LFINF 3storey
CR/LFINF+DNO/HBET:1,3	Sa (1,0)	0.0909	0.0437	0.2278	0.1229	0.3591	0.1854	0.6304	0.3373	Villar-Vega (2014) - LFINF/H:3/DNO
CR/LFINF/HBET:1,3	PGA	0.451	0.082	0.878	0.159	2.208	0.401	5.121	0.929	Rojas(2010) - LFINF 3storey
CR/LFINF+DUC/HBET:4,7	Sa (1,0)	0.1631	0.0672	0.566	0.2973	0.9536	0.5711	1.8859	1.4017	Villar-Vega (2014) - LFINF/H:5
CR/LFLS+DNO/HBET:1,3	Sa (1,0)	0.0909	0.0437	0.2278	0.1229	0.3591	0.1854	0.6304	0.3373	Villar-Vega (2014) - LFINF/H:3/DNO
CR/LFLS+DUC/HBET:1,3	PGA	0.451	0.082	0.878	0.159	2.208	0.401	5.121	0.929	Rojas(2010) - LFINF 3storey
CR/LFLS/HBET:1,3	PGA	0.451	0.082	0.878	0.159	2.208	0.401	5.121	0.929	Rojas(2010) - LFINF 3storey
CR/LFM+DUC/HBET:1,3	PGA	0.317	0.169	0.498	0.236	0.596	0.248	0.704	0.293	Liao (2006) - Reinforced Concrete, Moment Frame, Moderate Code (1-3 stories)
CR/LFM+DUC/HBET:4,7	PGA	0.317	0.169	0.553	0.262	0.65	0.271	0.737	0.307	Liao (2006) - Reinforced Concrete, Moment Frame, Moderate Code (4-7 stories)
CR/LWAL+DNO/HBET:1,3	Sd (0,1188)	0.201	0.068	0.301	0.119	1.551	2.001	4.428	4.867	Martinez2012-CR/LWAL/2storeys
CR/LWAL+DNO/HBET:4,7	Sd (0,352)	0.819	0.225	1.179	0.349	11.998	21.532	31.707	39.005	Martinez2012-CR/LWAL/5storeys
CR/LWAL+DUC/HBET:1,3	Sd (0,1188)	0.201	0.068	0.301	0.119	1.551	2.001	4.428	4.867	Martinez2012-CR/LWAL/2storeys
CR/LWAL+DUC/HBET:4,7	Sd (0,352)	0.819	0.225	1.179	0.349	11.998	21.532	31.707	39.005	Martinez2012-CR/LWAL/5storeys
CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	Sd (0,7573)	2.221	0.658	3.21	1.054	12.231	12.799	35.107	35.544	Martinez2012-CR/LWAL/12storeys
MUR+ADO	PGA	0.1803	0.0692	0.4312	0.1445	0.5541	0.1866	0.7593	0.2705	Villar-Vega (2014) - MUR+ADO/H:1
MUR+CBH:H:1	PGA	0.606	0.288	1.39	0.599	1.547	0.616	1.783	0.656	Acevedo et al. (2017) - MUR/HEX:1 In-plane
MUR+CBH:H:1,3	PGA	0.324	0.095	0.45	0.15	0.594	0.224	0.778	0.243	Acevedo et al. (2017) - MUR/HEX:3 In-plane
MUR+CBH:H:1,4	Sa (1,0)	0.4692	0.1477	1.005	0.3295	1.1923	0.3842	1.5737	0.5968	Villar-Vega (2014) - MCF/H:1/DNO
MCF+CBH+MOC/LPB+DNO; H:1,3	Sa (1,0)	0.1003	0.0529	0.2398	0.1495	0.3616	0.232	0.641	0.4283	Villar-Vega (2014) - MCF/H:3/DNO
MCF+CBH+MOC/LPB+DNO/HBET:2,3	Sa (1,0)	0.1003	0.0529	0.2398	0.1495	0.3616	0.232	0.641	0.4283	Villar-Vega (2014) - MCF/H:3/DNO
MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1	Sa (1,0)	0.1003	0.0529	0.2398	0.1495	0.3616	0.232	0.641	0.4283	Villar-Vega (2014) - MCF/H:3/DNO
MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1,3	Sa (1,0)	0.1003	0.0529	0.2398	0.1495	0.3616	0.232	0.641	0.4283	Villar-Vega (2014) - MCF/H:3/DNO
S+SR/LFM+DUC/HBET:1,3	PGA	0.283	0.151	0.553	0.262	0.65	0.271	0.812	0.338	Liao (2006) - Wood, Light Frame, Moderate Code
S+SR/LFM+DUC/HBET:4,7	PGA	0.283	0.151	0.553	0.262	0.65	0.271	0.812	0.338	Liao (2006) - Wood, Light Frame, Moderate Code
S+SR/LFM+DUC/HBET:8,19	PGA	0.283	0.151	0.553	0.262	0.65	0.271	0.812	0.338	Liao (2006) - Wood, Light Frame, Moderate Code
W+WS/HBET:1	PGA	0.283	0.151	0.553	0.262	0.65	0.271	0.812	0.338	Liao (2006) - Wood, Light Frame, Moderate Code
W+WS/HBET:1,2	PGA	0.283	0.151	0.553	0.262	0.65	0.271	0.812	0.338	Liao (2006) - Wood, Light Frame, Moderate Code
UNK	Sa (1,0)	0.4441	0.1651	0.9397	0.3926	1.2414	0.4651	1.7509	0.6856	Villar-Vega (2014) - UNK
ME+MEO	Sa (1,0)	0.4441	0.1651	0.9397	0.3926	1.2414	0.4651	1.7509	0.6856	Villar-Vega (2014) - UNK
MATO	Sa (1,0)	0.4441	0.1651	0.9397	0.3926	1.2414	0.4651	1.7509	0.6856	Villar-Vega (2014) - UNK
MUR+STDRE/HBET:1,2	PGA	0.1803	0.0692	0.4312	0.1445	0.5541	0.1866	0.7593	0.2705	Villar-Vega (2014) - MUR+ADO/H:1
MUR+STRUB/HBET:1,2	PGA	0.606	0.288	1.39	0.599	1.547	0.616	1.783	0.656	Acevedo et al. (2017) - MUR/HEX:1 In-plane

5.5.2. CURVAS DE VULNERABILIDADE

Geradas as curvas de fragilidade e atendendo que para todas as classes de edificações, e dada a semelhança na resposta sísmica, foram reduzidas para apenas 5 classes, conforme a Tabela 5.7. Com base nas classes representativas definidas, foi estimada a distribuição das respectivas funções de vulnerabilidade dentro do parque edificado de Angola. No presente estudo as perdas económicas foram estimadas através da aplicação das funções de vulnerabilidade que descrevem a distribuição da probabilidade dos índices de perdas à vários níveis de intensidade da acção sísmica. Assim, através da plataforma *OpenQuake* (<https://platform.openquake.org/vulnerability>) foram extraídas as funções de vulnerabilidade para as 5 classes definidas. São funções especificamente criadas para a região de África. As perdas das referidas funções foram determinadas através de modelos (*Damage-to-loss*), que correlacionam o estado de danos e índices de perdas. Neste modelo para cada nível de dano, que varia do fraco ao colapso é associado um índice/rácio de perda (*loss ratio*). No trabalho desenvolvido para a determinação da vulnerabilidade sísmica e modelo de perdas para a Costa Rica (Silva & Calderon, 2018), foi apresentada uma tabela com os níveis de danos e rácios de perda (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 - Modelo de dano-perda, que correlaciona cada estado de dano para rácios de perda. (Silva e Calderon, 2018).

Estado de dano	Rácio de perda
Ligeiro/fraco	0,05
Moderado	0,25
Severo	0,6
Colapso	1

E acordo com as classes definidas e agrupadas na tabela 5.8, foram escolhidas as respectivas curvas de vulnerabilidade, conforme Figuras 5.10, 5.11 e 5.12.

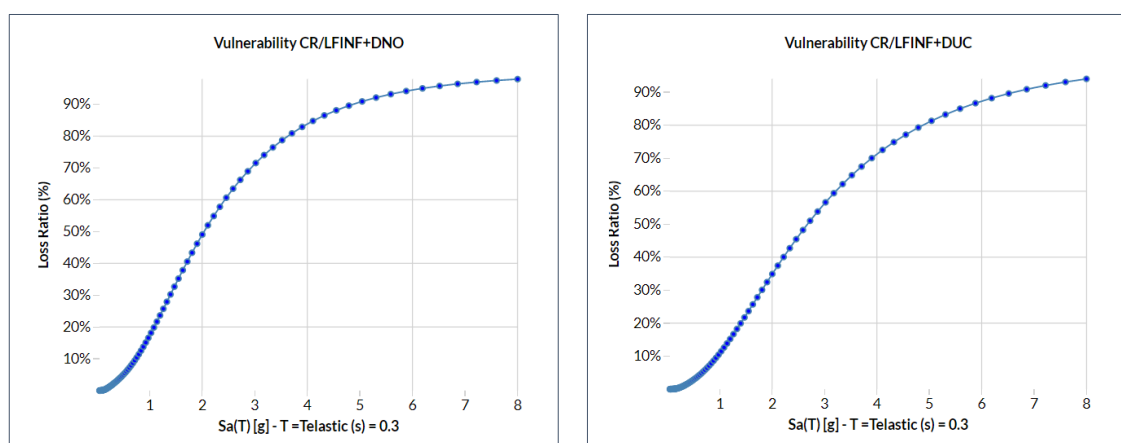


Figura 5.10 - Curvas de vulnerabilidades, classe CR/LINF+DNO (à esquerda) e CR/LINF+DUC (à direita). (Martins e Silva, 2018).

Tabela 5.7 - classes de edifícios uniformizadas para determinação das curvas de vulnerabilidade - Fonte: autor

Classe de edifícios	Classe - Curvas de vulnerabilidade assumida	Comentários
CR/LWAL+DUC/HBET:1,3; CR/LDUAL+DUC/HBET:4,7; CR/LDUAL+DUC/HBET:8,19; CR/LFINF+DUC/HBET:1,3; CR/LFINF+DNO/HBET:1,3; CR/LFINF/HBET:1,3; CR/LFINF+DUC/HBET:4,7; CR/LFLS+DNO/HBET:1,3; CR/LFLS+DUC/HBET:1,3; CR/LFLS/HBET:1,3; CR/LFM+DUC/HBET:1,3; CR/LFM+DUC/HBET:4,7; CR/LWAL+DNO/HBET:1,3; CR/LWAL+DNO/HBET:4,7; CR/LWAL+DUC/HBET:1,3; CR/LWAL+DUC/HBET:4,7; CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	CR/LINF+DNO; CR/LINF+DUC	Assumindo que os edifícios de betão armado, independentemente do sistema de resistência lateral, têm um comportamento sísmico muito parecido, em função da ductilidade ou não. Assim, resolveu-se assumir a classe de Betão Armado com preenchimento de alvenaria confinada entre painéis.
MCF+CBH+MOC/LPB+DNO; H:1; MCF+CBH+MOC/LPB+DNO; H:1,3; MCF+CBH+MOC/LPB+DNO/HBET:2,3; MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1; MCF+CLBRH+MOC/LO+DNO/HAPP:1,3	MCF/H:1-2	Todas as classes de alvenarias confinadas, independentemente da ductilidade do sistema, foi assumida a classe de alvenaria confinada com 1-2 pisos, disponível na base de dados da GEM.
MUR+ADO; MUR+CBH,H:1; MUR+CBH,H:1,3	MUR+ADO	As alvenarias de bloco de betão/tijolo não reforçadas sem confinamento e alvenaria de adobes foram agrupados numa única classe.
W+WS/HBET:1; W+WS/HBET:1,2	W+WHE/HBET:2; W+WHE/HBET:1	Todas as classes de estruturas de madeira foram alocadas na classe de estruturas de madeira pesada, uma vez que não existe disponível na base do GEM classes com funções de vulnerabilidade com madeira sólida.
S+SR/LFM+DUC/HBET:1,3; S+SR/LFM+DUC/HBET:4,7; S+SR/LFM+DUC/HBET:8,19; UNK; ME+MEO; MATO; MUR+STDRE/HBET:1,2; MUR+STRUB/HBET:1,2	UNK	As estruturas de casas de pau-à-pique, de chapas de zinco, outros materiais não conhecidos foram colocados na curva de vulnerabilidade da classe dos desconhecidos.

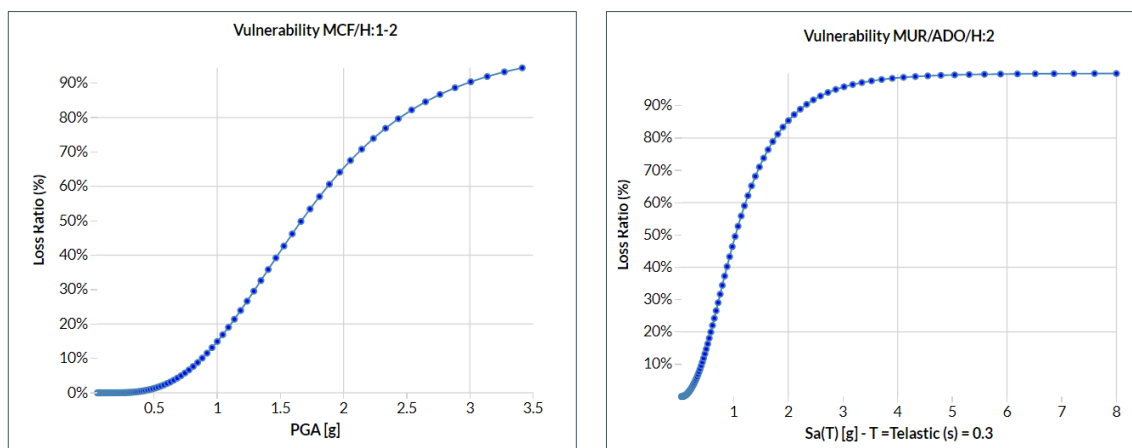


Figura 5.11 - Curvas de vulnerabilidades, classe MCF/H:1-2 (à esquerda) e MUR+ADO/HBET:1 (à direita).
Fonte: Martins e Silva, 2018

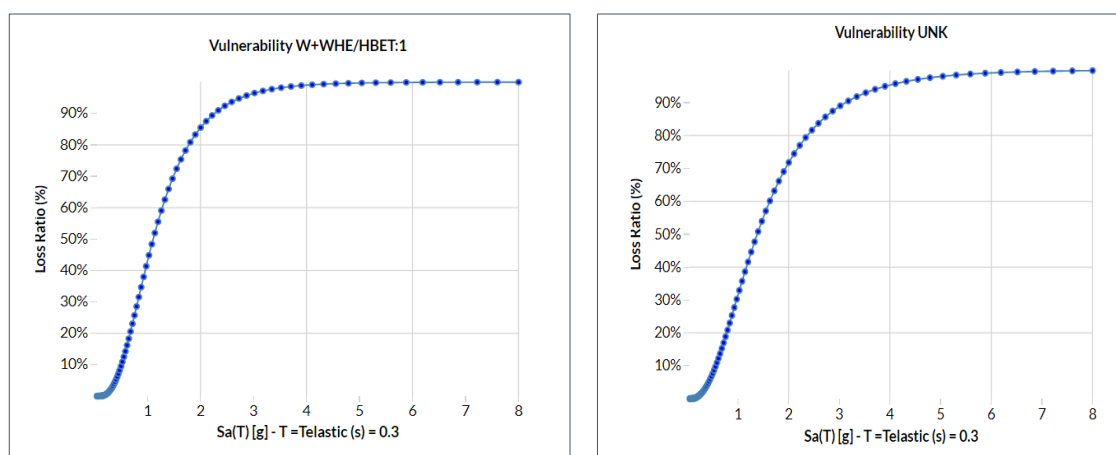


Figura 5.12 - Curvas de vulnerabilidades, classe W+WHE/HBET:1 (à esquerda) e UNK (à direita). Fonte: Martins e Silva, 2018

5.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nas funções de vulnerabilidade, foi determinado o número de edifícios distribuídos geograficamente e em frações de classes de vulnerabilidade (Tabela 5.8). É possível verificar de que as funções MUR+ADO representam cerca de 72% do parque edificado de Angola, com números mais elevados nas províncias do Cuanza-sul, seguindo-se as do Huambo e Huíla. Luanda apresenta a maior fracção de edifícios de betão armado (CR/LINF+DNO; CR/LINF+DUC) e alvenaria confinada (MCF/H:1-2) seguida da província do Huambo. As classes estruturais desconhecidas (UNK) que congrega edifícios de chapas metálicas de zinco, desconhecidas e outras representam a segunda maior fracção ao nível do país, com cerca de 22%, tendo a província da Huíla o maior número, agravando a probabilidade de danos em caso de ocorrência de um evento sísmico, dada a perigosidade a que está submetida (Figura 5.13). A classe relativa às estruturas de madeira tem uma representação insignificante, cerca de 0.2% do parque edificado de Angola, com predominância na província de Luanda.

Tabela 5.8 - Número de edifícios por classes de funções de vulnerabilidade - Fonte. Autor

Província	Nº de edifícios por classes de vulnerabilidade (milhares)					Total de edifícios
	CR/LINF+DNO; CR/LINF+DUC	MCF/H:1- 2	MUR+ADO	W+WHE/HBET:2; W+WHE/HBET:1	UNK	
	6,45%	6,50%	69,66%	0,36%	17,03%	
Bengo	3,34	3,36	36,06	0,19	8,81	51,76
Benguela	12,44	12,54	134,42	0,69	32,86	192,95
Bié	12,48	12,58	134,90	0,69	32,98	193,64
Cabinda	2,07	2,09	22,38	0,12	5,47	32,12
C. Cubango	3,38	3,41	36,51	0,19	8,93	52,41
Cuanza-norte	2,53	2,55	27,35	0,14	6,69	39,25
Cuanza-sul	17,92	18,06	193,62	1,00	47,33	277,93
Cunene	9,38	9,45	101,32	0,52	24,77	145,44
Huambo	16,08	16,21	173,80	0,89	42,49	249,48
Huíla	23,00	23,18	248,54	1,28	60,76	356,76
Lunda-Norte	5,70	5,74	61,58	0,32	15,06	88,40
Lunda-sul	2,00	2,02	21,64	0,11	5,29	31,07
Malange	7,04	7,09	76,03	0,39	18,59	109,14
Moxico	5,19	5,23	56,10	0,29	13,72	80,53
Namibe	2,46	2,48	26,61	0,14	6,51	38,20
Uíge	12,87	12,98	139,11	0,72	34,01	199,68
Zaire	2,49	2,51	26,86	0,14	6,57	38,56
Luanda	5,93	5,98	64,07	0,33	15,66	91,96
Total	146,30	147,47	1 580,89	8,14	386,49	2 269,29

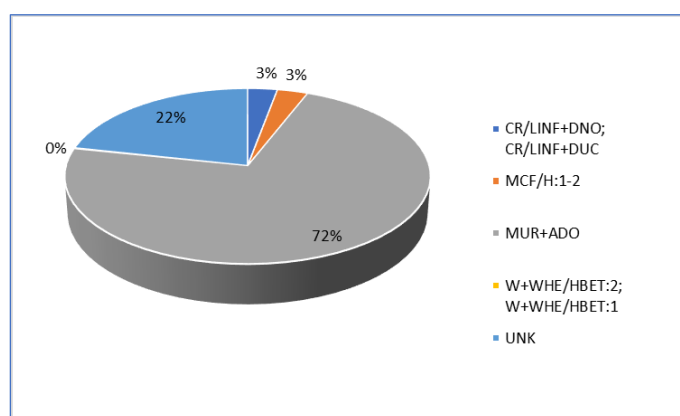


Figura 5.13 - Distribuição de números de edifícios por funções de vulnerabilidade. Fonte: autor.

No geral, o elevado número de edifícios da classe MUR+ADO, que representa mais de 70% do parque edificado, eleva a probabilidade de danos estruturais que possam levar à perdas humanas e económicas

consideráveis. Este facto deve ser considerado na concepção de planos nacionais que visam melhorar o crescimento urbano, considerando, por meio de regulamentos, a implementação de critérios de engenharia na concepção das estruturas de edifícios de modo a melhorar a sua capacidade de resposta face às acções horizontais, em especial às sísmicas.

6

AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO

6.1. INTRODUÇÃO

O risco sísmico pode ser considerado um parâmetro que indica uma potencial de perdas e danos, causados pela ocorrência de um determinado evento sísmico (Vicente, 2008). Determina-se confluindo os modelos de perigosidade, a exposição e vulnerabilidade, resultando na determinação das potenciais perdas económicas e, eventualmente, humanas relacionadas ao parque edificado de uma região.

A frequência de eventos sísmicos catastróficos é muito baixa e, por isso, a informação sobre dados históricos é muito limitada. Tendo em consideração a possibilidade da ocorrência de eventos futuros é necessário estimar o risco, baseando-se, principalmente, em métodos probabilísticos, dadas as incertezas associadas, de forma a melhor prever os cenários futuros. Neste sentido os especialistas ligados à sismologia e engenharia estrutural têm desenvolvido modelos que permitem estimar os riscos associados às perdas humanas e económicas em caso de ocorrência de eventos sísmicos (Cardona *et al.*, 2006).

Autores como Caicedo (Caicedo *et al.*, 1994), Cardona (Cardona, 2001), Coburn e Spence, (Coburn & Spence, 2002), McGuire (McGuire, 2004) e Barbate (Barbate *et al.*, 2010) definem o risco sísmico como sendo o resultado da expressão matemática que correlaciona a perigosidade, vulnerabilidade e exposição, conforme equação (6.1) abaixo:

$$R_{ie}|T = | (H_i \cdot V_e) \cdot E|T \quad (6.1)$$

Onde:

R_{ie} : é a probabilidade de excedência de um determinado nível de perda de um elemento (edifício) exposto à ocorrência de um evento sísmico a um determinado nível de intensidade i ;

H: é a probabilidade de excedência de um determinado nível de actividade sísmica com intensidade i durante um período de retorno/recorrência T ;

V: é a vulnerabilidade de predisposição intrínseca de um determinado elemento e sofrer danos face a um evento sísmico com intensidade i ;

E: é a exposição dos elementos a um dado risco, que reflecte o valor económico dos elementos expostos.

Vários métodos para a determinação do risco para a tomada de decisão, não só para aspectos geofísicos e estruturais como também económico, social, indicadores institucionais, entre outros, são considerados como sendo “abordagem holística”, também denominada integral ou compreensiva e integra vários aspectos. Ainda assim, importa referir que os cenários urbanos com potenciais danos, também considerados cenários de aspectos físicos do risco, são essenciais, pois resultam da convergência da perigosidade e a vulnerabilidade física dos edifícios e infraestruturas.

Em resumo, embora as abordagens reducionistas e holísticas para a determinação do risco sejam válidas, actualmente, a holística é preferível à determinística pelo facto de permitir uma análise compreensiva de gestão de risco, que inclui não só a vulnerabilidade física dos edifícios como também outras vulnerabilidades através do planeamento urbano, educação, nível de preparação em casos de emergências, etc. (Cardona, 2001).

Cardona (Cardona, 2001) desenvolveu uma plataforma e modelo de análise de risco de uma cidade numa perspectiva holística, onde risco sísmico foi determinado considerando as médias dos índices. Considerou, para o efeito, variáveis de risco “fortes” e “fracas” dos centros urbanos, tendo em conta o modelo de exposição, características socioeconómicas de diferentes áreas ou zonas circunscritas do local e o seu grau de resiliência ou capacidade de suporte de desastres naturais. O estudo do modelo serviu como guia base para o processo de tomada de decisão na gestão de risco sísmico, ajudando a identificar zonas da cidade e a sua vulnerabilidade de uma perspectiva de diferentes áreas profissionais.

Posteriormente, baseando no método de Cardona (Cardona, 2001; Barbat & Cardona 2003), foi desenvolvido por Carreño (Carreño, 2006) um outro método na perspectiva holística no qual usou índices compostos para a avaliação do risco sísmico de forma diferente. O nível de danos e perdas nos elementos expostos (edifícios e infraestruturas), através de cenários de riscos, foi usada como informação de base para a determinação do risco físico individual de cada elemento em análise. Esta metodologia permitiu melhorar os procedimentos de normalização e de cálculo dos índices do risco final de forma absoluta. O modelo conceptual da abordagem holística é apresentado na figura 6.1.

Surgiu, posteriormente, uma abordagem alternativa para o cálculo do risco, usando um conjunto de teorias de Fuzzy, de forma a providenciar uma ferramenta mais flexível em casos em que não há informação suficiente ou mesmo inexistente. A abordagem consiste num modelo que se apoia nas metodologias prévias. Portanto, deste ponto de vista compreensivo, nota-se que o risco é uma função da vulnerabilidade física ou potencial físico e um conjunto de factores de vulnerabilidade, que caracterizam as condições de vulnerabilidade do contexto. A vulnerabilidade física dos elementos é obtida através da susceptibilidade dos elementos expostos à perigosidade sísmica, considerando uma potencial intensidade (I) do evento sísmico num determinado período (t). Já a vulnerabilidade do contexto depende das

fragilidades sociais e de aspectos relacionados com a falta de resiliência do sistema técnico da zona em estudo face à ocorrência de desastre natural. Portanto, é necessária a aplicação de medidas de engenharia que permitam a redução da vulnerabilidade sísmica dos elementos expostos e por consequente a redução do risco sísmico do local em análise (Cardona, Barbat e Carreno, 2012).

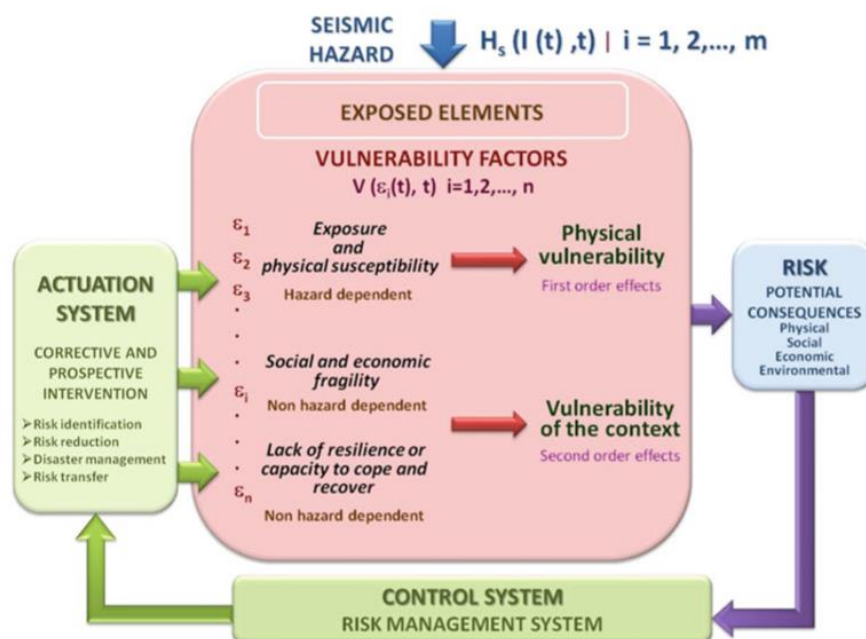


Figura 6.1 - Modelo conceptual de determinação de risco – abordagem holística (Carreño, 2006)

Várias iniciativas no sentido de criar *softwares* para a determinação do risco sísmico têm sido lançadas. Destaca-se inicialmente o conhecido software HAZUS (FEMA, 2003) como sendo uma aplicação pioneira na determinação do risco sísmico, cujos códigos serviram de base para desenvolver outros *softwares* para a determinação de risco sísmico.

No ano 2009 o GEM lançou um projecto denominado GEM1 com o objectivo de desenvolver uma infraestrutura de IT inicial do GEM. Para o efeito, foram avaliadas várias aplicações de perigosidade e risco sísmico tais como SELENA, EQRM, ELER, QLARM, CEDIM, CAPRA, RiskScape, LNECLoss, MAEZviz, OpenRisk, com o propósito de entender as suas capacidades e limitações e assim permitir a especificação inicial dos requerimentos científicos para o software *OpenQuake* do GEM (Danciu *et al.*, 2010; Crowley *et al.*, 2010).

Como consequência, foi apresentado o projecto *OpenQuake* (Silva *et al.* 2013), como plataforma de avaliação de risco, que permite modelar, observar, explorar e gerir o risco sísmico. O *software* consiste em 5 calculadoras essenciais (Tabela 6.1), sendo que cada uma contribui unicamente na área em que se avalia o risco sísmico e seus respectivos aspectos de mitigação.

Trata-se de uma plataforma muito utilizada na avaliação da perigosidade e do risco sísmico de cidades. Integra os modelos de perigosidade e considera os de exposição e vulnerabilidade para a determinação do risco sísmico e o valor das perdas económicas. A determinação do risco na plataforma é determinada com base em abordagens probabilísticas (Figura. 6.2), nomeadamente:

- i) Método de determinação de risco baseado Probabilidade de Eventos sísmicos (*Probabilistic Event-based Risk Calculation Workflow*) que consiste na determinação da probabilidade de perdas para um conjunto de activos, com base na perigosidade sísmica, com uma abordagem baseada em eventos sísmicos, para que sejam determinadas, em cada evento, as perdas simultâneas de um conjunto de elementos expostos;
- ii) Método de determinação de risco baseado no Clássico PSHA (*Classical PSHA-based Risk Calculation Workflow*), sendo um método com arquitectura inicial similar ao anterior, no qual o processador da árvore lógica usa uma estrutura definidas no Sistema das Fontes Sísmicas para a obtenção de parâmetros necessários para a calculadora, que produz uma lista de possíveis rupturas que ocorrem em todas as fontes incluindo o modelo de perigosidade.

Por exemplo, segundo (Calderon e Silva, 2018) na metodologia probabilística baseada em eventos sísmicos, a perigosidade sísmica ajustada (PGA ou S_a) a cada local e a função de vulnerabilidade para cada elemento/estrutura são usadas para a determinação do rácio de perda (*loss ratio*). Por sua vez, a perda económica final é determinada, multiplicando o rácio de perda ao custo de reposição associado aos elementos expostos.

A média de perdas anualizadas (AAL) pode ser obtida dividindo a soma das perdas económicas pelo total de números de anos, conforme a expressão abaixo:

$$\overline{AL_n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j I(L_i > l) \quad (6.2)$$

Onde, L_i representa a perda por ruptura i , j é o número total de rupturas sísmica e n o total de anos. O rácio da média de perdas anuais pode ser obtido, dividindo cada valor obtido da expressão anterior pelo custo de reposição associado. Por sua vez, estes valores podem ser usados para determinar o rácio em que são excedidos diferentes níveis de perdas, considerando a equação abaixo:

$$\lambda(L > l) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j I(L_i > l) \quad (6.3)$$

Onde $I(L_i > l)$ representa o número de perdas acima do valor de l , e j é o número total de perdas geradas. A relação entre os diferentes níveis de perda e os respectivos rácios de excedência origina a curva da probabilidade de excedência de perdas (PE). Este rácio pode ser convertido em probabilidade de excedência num determinado intervalo de tempo, usando uma a distribuição de *Poisson*, como abaixo:

$$P(L > l, t) = 1 - e^{-\lambda(L>l)t} \quad (6.4)$$

De igual forma, a probabilidade de excedência pode ainda ser usada para calcular o período de retorno (PR) expectável, invertendo o rácio, como abaixo:

$$RP(L > I) = \frac{1}{\lambda(L > I)} \quad (6.5)$$

Tabela 6.1 - Principais calculadoras do OpenQuake, (Silva et al., 2013)

Calculadora	Símbolo	Objectivo
Cenário de risco	SCN	Esta calculadora é capaz de computar as perdas e estatísticas das perdas face a um cenário de evento sísmico isolado, para uma coleção de bens, importante, por exemplo, para o planeamento de gestão de emergências e para o aumento da consciencialização social sobre o risco.
Avaliação de cenário de danos	DAS	Esta calculadora é capaz de determinar a distribuição de danos face a um cenário de evento sísmico isolado, para uma coleção de bens, que pode ser usado para o planeamento de gestão de emergências ou saber que activos são vulneráveis à acção sísmica.
Risco - Eventos Probabilísticos	PEB	Esta calculadora determina a probabilidade de perdas e estatísticas das perdas para um conjunto de activos, com base na probabilidade da perigosidade sísmica. As perdas são calculadas com base na abordagem baseada em eventos sísmicos, assim como como perdas simultâneas a um conjunto (ou portfólio) de activos podem ser calculadas. O resultado ou output da calculadora pode ser usada para avaliar as perdas agregadas expectáveis para um conjunto de activos.
Risco - Método clássico PSHA	CPB	Esta calculadora leva à computação da probabilidade de perdas e estatísticas de perdas para um activo isolado, baseando-se na descrição probabilística da perigosidade. A saída/output desta calculadora pode ser usada para a avaliação comparativa de risco entre activos em diferentes locais, que pode ser usado, por exemplo, para a priorização de medidas de mitigação.
Rácio Custo-Benefício	BCR	A calculadora é uma ferramenta que serve de suporte para a tomada de decisão, para decidir se a aplicação de medidas de reforço de estruturas de um conjunto de edifícios existentes é vantajosa do ponto de vista económico. A saída pode ser usada para priorizar as regiões com necessidade de actividades de reforço estrutural ou para avaliar se os projectos sísmicos são economicamente adequados para uma dada região.

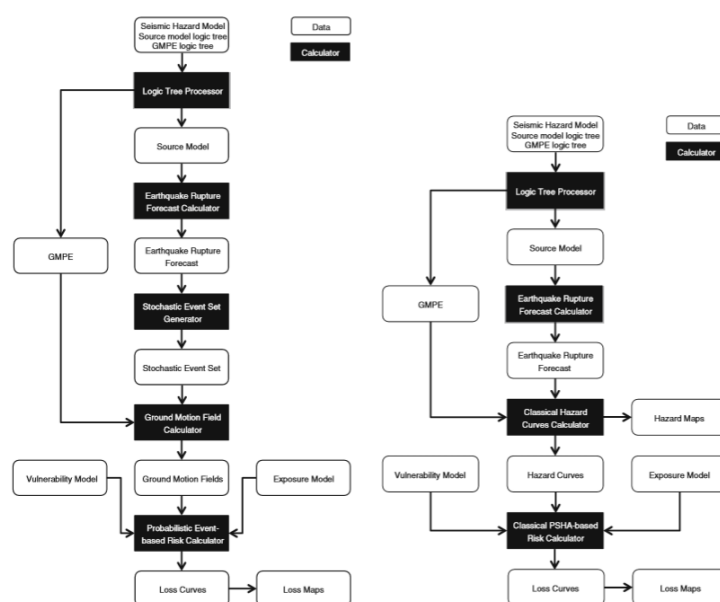


Figura 6.2 - Algoritmo de determinação de risco baseado em eventos probabilístico (a esquerda) e Algoritmo de determinação do risco baseado no método clássico do PSHA (direita) - (Silva et al., 2013).

6.2. SOBREPOSIÇÃO DA VULNERABILIDADE VS. PERIGOSIDADE

Avaliados os modelos de perigosidade, exposição e vulnerabilidade, que levaram ao conhecimento das acelerações do solo para um período de retorno de 475 anos, o número de edifícios expostos a estas acções e suas respectivas classes estruturais e as funções de vulnerabilidade, mediante a qual podemos determinar o índice de perdas em função da intensidade de um determinado evento sísmico, e com o objectivo de se identificar a distribuição do nível de perdas que pode ser causado em cada província, fez-se uma sobreposição das funções de vulnerabilidade ao mapa de perigosidade, conforme tabela 6.2 e figura 6.3.

As províncias do Huambo, Huíla e Benguela apresentam perigosidade caracterizadas por acelerações que variam dos 0.05 a 0.07 m/s², e números elevados de edifícios, tendo como classe de vulnerabilidade predominante MUR+ADO com mais de 60% do parque edificado. Se considerarmos as restantes classes, com excepção das relativas ao betão armado e alvenarias confinadas, podemos concluir de que mais de 90% do parque edificado da quase totalidade das províncias de Angola não possui resistência lateral suficiente para responder com segurança às solicitações das acções sísmicas. No caso particular das províncias do Huambo, Huíla e Benguela, agravam-se as probabilidades de danos e consequentemente perdas económicas por estarem expostas à perigosidade mais elevadas do que às restantes províncias.

A província do Moxico possui o PGA mais alto, no valor de 0.11m/s² e um parque edificado com cerca de 80 mil edifícios, dos quais predomina igualmente a classe de vulnerabilidade MUR+ADO e UNK. Portanto, quase 96% do parque edificado pode ser considerado bastante vulnerável à acção sísmica, e por isso, em caso de ocorrência de um evento sísmico com magnitude considerada poderá levar à danos moderados à severos e consequentemente perdas humanas e económicas consideráveis.

Tabela 6.2 - Sobreposição das funções de vulnerabilidade com a perigosidade - Fonte: autor

Província	PGA (m/s ²)	Nº de edifícios por classes de vulnerabilidade (milhares)					Total de edifícios
		CR/LINF+ DNO; CR/LINF+ DUC	MCF/H:1-2	MUR+ADO	W+WHE/HBE T:2; W+WHE/HBE T:1	UNK	
Bengo	0,05	3,34	3,36	36,06	0,19	8,81	51,76
Benguela	0,07	12,44	12,54	134,42	0,69	32,86	192,95
Bié	0,01	12,48	12,58	134,90	0,69	32,98	193,64
Cabinda	0,03	2,07	2,09	22,38	0,12	5,47	32,12
C. cubango	0,03	3,38	3,41	36,51	0,19	8,93	52,41
Cuanza-norte	0,03	2,53	2,55	27,35	0,14	6,69	39,25
Cuanza-sul	0,05	17,92	18,06	193,62	1,00	47,33	277,93
Cunene	0,04	9,38	9,45	101,32	0,52	24,77	145,44
Huambo	0,05	16,08	16,21	173,80	0,89	42,49	249,48
Huíla	0,07	23,00	23,18	248,54	1,28	60,76	356,76
Lunda-Norte	0,01	5,70	5,74	61,58	0,32	15,06	88,40
Lunda-sul	0,01	2,00	2,02	21,64	0,11	5,29	31,07
Malange	0,02	7,04	7,09	76,03	0,39	18,59	109,14
Moxico	0,11	5,19	5,23	56,10	0,29	13,72	80,53
Namibe	0,04	2,46	2,48	26,61	0,14	6,51	38,20
Uíge	0,02	12,87	12,98	139,11	0,72	34,01	199,68
Zaire	0,03	2,49	2,51	26,86	0,14	6,57	38,56
Luanda	0,04	5,93	5,98	64,07	0,33	15,66	91,96
Total		146,30	147,47	1 580,89	8,14	386,49	2 269,29

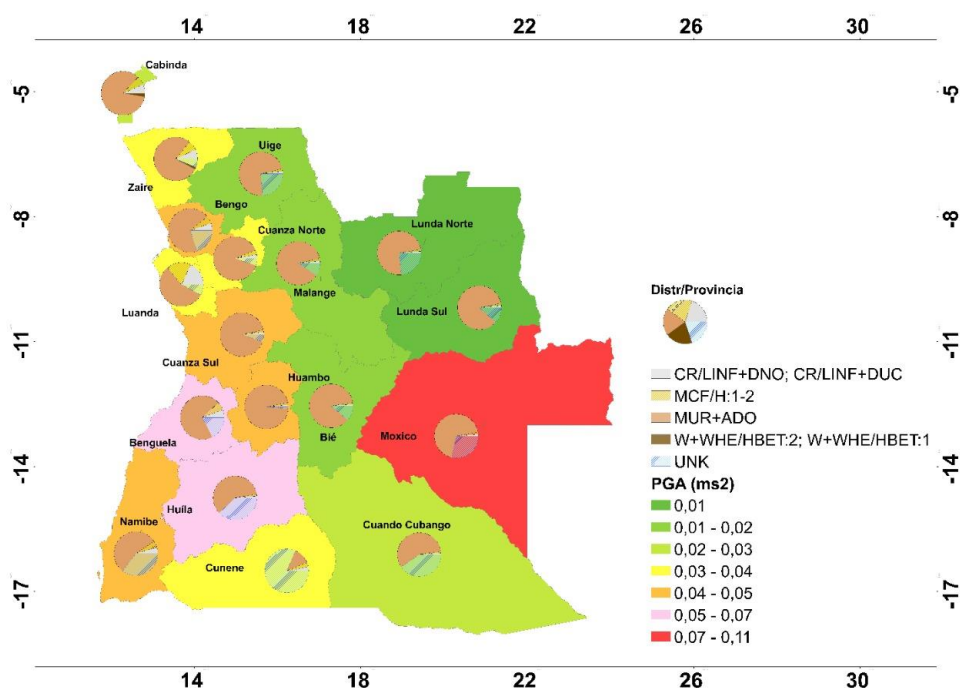


Figura 6.3 - Sobreposição das funções de vulnerabilidade sobre a perigosidade. Fonte: autor

6.3. MAPAS DE RÁCIOS DE PERDAS E RESPECTIVAS PERDAS ECONÓMICAS

A determinação do risco sísmico, no presente estudo, seguiu uma abordagem holística, recorrendo ao método de determinação de risco, baseado na Probabilidade de Eventos sísmicos (*Probabilistic Event-based Risk Calculation Workflow*). As funções de vulnerabilidade das classes estruturais definidas foram cruzadas com a informação sobre a intensidade da aceleração dos solos, quer através da aceleração de pico do solo (PGA) ou através de acelerações espectrais. Com excepção de uma função de vulnerabilidade, todas estão expressas em termos de aceleração espectral – S_a (0.3). Dado que o modelo de perigosidade para Angola, extraído da plataforma do GEM, está em expresse em PGA, todas as curvas de vulnerabilidade foram convertidas de S_a (0.3) para PGA, multiplicando a aceleração espectral pelo valor do coeficiente de 2.5, conforme previsto na forma do espetro de resposta de cálculo designado no EC8 (CEN, 2010), conforme figura 5.2.

A partir das curvas de vulnerabilidade, foi possível a determinação dos valores dos rácios de perdas (*loss ratio*), cruzando a informação relativa à perigosidade, expressa em termos PGA, localizados no eixo das abcissas. Por conseguinte, com o valor do PGA, tirou-se no eixo das ordenadas os correspondentes valores dos rácios de perdas. Foi, posteriormente, retirado o valor médio do LR das classes de vulnerabilidade para cada província, conforme indicação na tabela 6.3 e mapa na figura 6.4.

Tabela 6.3 - Valores de *loss ratio* para cada função de vulnerabilidade e distribuídos pelo país – Fonte: autor

Província	PGA (m/s ²)	$S_a(T) =$ Telestati c(s)=0,3	Valores de índice/rácio de perdas (Loss Ratio) em função das funções de vulnerabilidade					Valor médio
			CR/LINF+D NO	MCF/H:1 -2	MUR+ ADO	W+WHE/H BET:2; W+WHE/H BET:1	UNK	
			CR/LINF+D UC					
			LR (%)	LR (%)	LR (%)	LR (%)	LR (%)	
Bengo	0,05	0,12	0,80%	0,30%	1,60%	1,60%	1,55%	1,17%
Benguela	0,07	0,18	1,10%	0,40%	2,00%	2,00%	1,95%	1,49%
Bié	0,01	0,03	0,30%	0,10%	0,60%	0,60%	0,55%	0,43%
Cabinda	0,03	0,06	0,40%	0,20%	0,90%	0,90%	0,85%	0,65%
C.cubango	0,03	0,07	0,45%	0,20%	1,00%	1,00%	0,95%	0,72%
Cuanza-norte	0,03	0,08	0,50%	0,20%	1,10%	1,10%	1,15%	0,81%
Cuanza-sul	0,05	0,12	0,80%	0,30%	1,60%	1,60%	1,55%	1,17%
Cunene	0,04	0,10	0,20%	0,25%	0,50%	0,50%	0,45%	0,38%
Huambo	0,05	0,12	0,80%	0,30%	1,60%	1,60%	1,55%	1,17%
Huíla	0,07	0,17	1,00%	0,40%	1,90%	1,90%	1,85%	1,41%
Lunda-Norte	0,01	0,01	0,10%	0,10%	0,50%	0,50%	0,45%	0,33%
Lunda-sul	0,01	0,03	0,30%	0,10%	0,90%	0,90%	0,85%	0,61%
Malange	0,02	0,04	0,40%	0,18%	1,10%	1,10%	1,05%	0,77%
Moxico	0,11	0,29	1,50%	1,00%	3,00%	3,00%	2,95%	2,29%
Namibe	0,04	0,10	0,10%	0,25%	0,50%	0,50%	0,45%	0,36%
Uíge	0,02	0,04	0,40%	0,18%	0,70%	0,70%	0,65%	0,53%
Zaire	0,03	0,08	0,50%	0,20%	1,10%	1,10%	1,05%	0,79%
Luanda	0,04	0,09	0,60%	0,18%	1,20%	1,20%	1,15%	0,87%

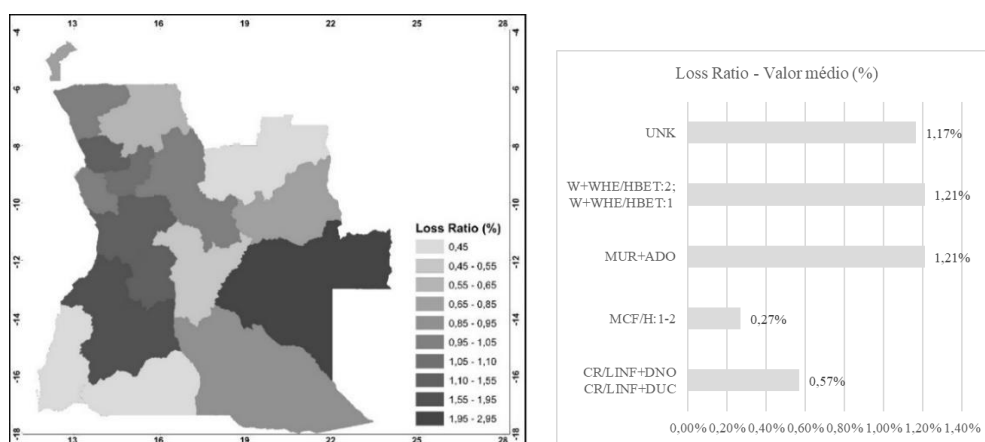


Figura 6.4 - Distribuição do valor médio do *loss ratio* por província (à esquerda) e valor médio do *loss ratio* para cada função de vulnerabilidade (à direita). Fonte: autor

Do mapa verifica-se que a província do Moxico e do Lubango têm os valores mais altos de *loss ratio*, ao passo que as províncias da Lunda-Norte, Cunene, Huambo e Bié os valores mais baixos. Para as funções de vulnerabilidade, verifica-se que a classe MUR+ADO, e W+WHE/HBET:2; W+WHE/HBET:1 e UNK apresentam os valores mais altos, situando-se entre 1.05% e 1.10%, ao passo que as outras duas classes CR/LINF+DNO; CR/LINF+DUC e MCF/H:1-2, apresentam valores mais baixos, inferiores à 0.5%, dada a sua boa capacidade de resposta face às acções sísmicas. Embora a província do Moxico apresente o valor mais alto em termos de *loss ratio*, pode, eventualmente, apresentar um baixo valor de perdas económicas, dada a baixa exposição de elementos, por ter um dos mais baixos números de edifícios, comparada com as da Huíla, Benguela, Huambo e Luanda. A província de Luanda tem um valor médio de LR na ordem dos 1.15%, muito inferior à média das províncias do Moxico e Lubango.

As perdas económicas foram determinadas, considerando a quantidade de edifícios, distribuídos por classes de vulnerabilidade, multiplicado pelo respectivo custo de reposição edifícios com base na percentagem do *loss ratio*. O valor total das perdas esperadas para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos é de USD 693 milhões, para o total do parque edificado de Angola. A classe MUR+ADO representa cerca de 77% do valor total de perdas esperadas, cenário previsível dado o seu elevado número de edifícios e altos valores de *loss ratio*, pelo fraco sistema de resistência lateral. Seguem-se as classes UNK e CR/LINF+DNO; CR/LINF+DUC, MCF/H:1-2. A classe referente às estruturas de madeira tem valores praticamente insignificantes.

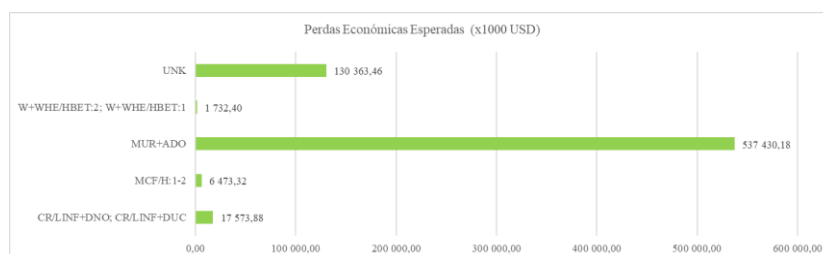


Figura 6.5 - Perdas económicas esperadas, distribuídas por classes de vulnerabilidade, para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e período de retorno de 475 anos. Fonte: Autor

Tabela 6.4 - Perdas económicas, por classes de vulnerabilidade, para probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos – Fonte: autor

Província	PGA Sa(T) = (m/s Telestatic 2) (s)=0,3	Perdas Económicas Esperadas para o PR de 475 anos (x1000 USD)											
		CR/LINF+DNO; CR/LINF+DUC		MCF/H:1-2		MUR+ADO		W+WHE/HBET:2; W+WHE/HBET:1		UNK		Total	
		LR (%)	Perdas	LR (%)	Perdas	LR	Perdas	LR	Perdas	LR (%)	Perdas		
Bengo	0,05 0,12	0,80%	553,18	0,30%	209,10	1,60%	11 955,27	1,60%	61,55	1,55%	2 831,45	15 610,55	
Benguela	0,07 0,18	1,10%	3 441,14	0,40%	1 261,32	2,00%	67 608,94	2,00%	348,09	1,95%	16 115,58	88 775,07	
Bié	0,01 0,03	0,30%	768,24	0,10%	258,13	0,60%	16 603,24	0,60%	85,48	0,55%	3 720,84	21 435,93	
Cabinda	0,03 0,06	0,40%	324,36	0,20%	163,48	0,90%	7 886,38	0,90%	40,60	0,85%	1 820,92	10 235,74	
Cuando-cubano	0,03 0,07	0,45%	358,38	0,20%	160,55	1,00%	8 605,98	1,00%	44,31	0,95%	1 998,76	11 167,99	
Cuanza-norte	0,03 0,08	0,50%	324,25	0,20%	130,74	1,10%	7 708,43	1,10%	39,69	1,15%	1 970,19	10 173,30	
Cuanza-sul	0,05 0,12	0,80%	2 885,49	0,30%	1 090,70	1,60%	62 361,17	1,60%	321,07	1,55%	14 769,41	81 427,84	
Cunene	0,04 0,10	0,20%	353,08	0,25%	444,88	0,50%	9 538,47	0,50%	49,11	0,45%	2 098,74	12 484,28	
Huambo	0,05 0,12	0,80%	2 724,80	0,30%	1 029,96	1,60%	58 888,29	1,60%	303,19	1,55%	13 946,90	76 893,14	
Huíla	0,07 0,17	1,00%	4 513,98	0,40%	1 820,01	1,90%	92 678,07	1,90%	477,16	1,85%	22 061,36	121 550,58	
Lunda-Norte	0,01 0,01	0,10%	137,61	0,10%	138,71	0,50%	7 435,16	0,50%	38,28	0,45%	1 635,95	9 385,71	
Lunda-sul	0,01 0,03	0,30%	185,03	0,10%	62,17	0,90%	5 998,28	0,90%	30,88	0,85%	1 384,97	7 661,33	
Malange	0,02 0,04	0,40%	627,09	0,18%	284,44	1,10%	18 634,91	1,10%	95,94	1,05%	4 348,72	23 991,11	
Moxico	0,11 0,29	1,50%	1 764,10	1,00%	1 185,46	3,00%	38 125,68	3,00%	196,29	2,95%	9 165,49	50 437,03	
Namibe	0,04 0,10	0,10%	62,36	0,25%	157,15	0,50%	3 369,44	0,50%	17,35	0,45%	741,37	4 347,67	
Uíge	0,02 0,04	0,40%	1 036,29	0,18%	470,05	0,70%	19 596,66	0,70%	100,89	0,65%	4 448,72	25 652,61	
Zaire	0,03 0,08	0,50%	374,87	0,20%	151,15	1,10%	8 911,82	1,10%	45,88	1,05%	2 079,70	11 563,41	
Luanda	0,04 0,09	0,60%	3 410,89	0,18%	1 031,44	1,20%	73 716,08	1,20%	379,53	1,15%	17 270,94	95 808,88	
TOTAL			23 845,16		10 049,43		519 622,27		2 675,30		122 410,01	678 602,18	

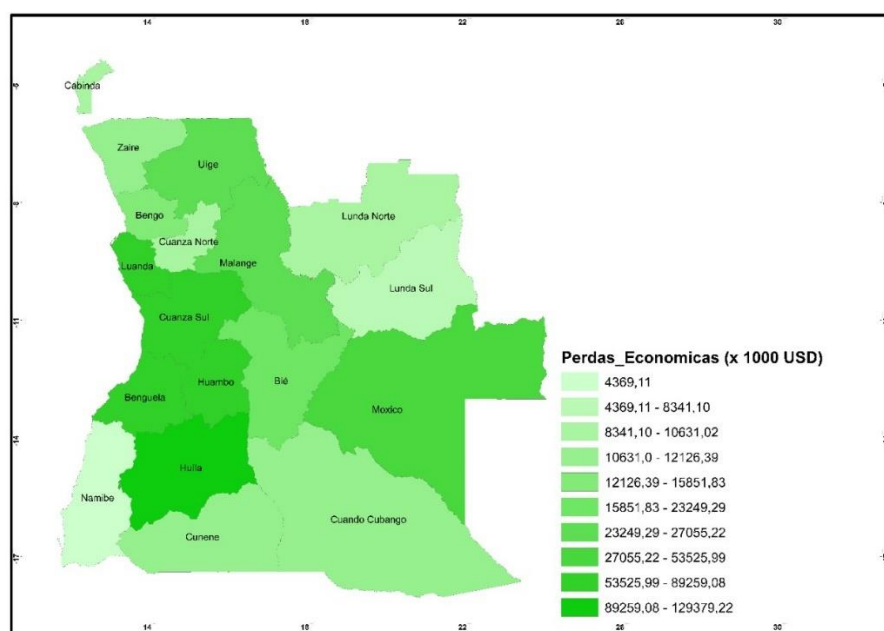


Figura 6.6 - Perdas económicas, distribuídas por províncias, para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e período de retorno de 475 anos. Fonte: Autor

A província da Huíla apresenta o valor mais alto de perdas económicas, cerca de 20% do total de perdas, seguida de Benguela, Cuanza-sul e Luanda. Por sua vez a província do Namibe apresenta o mais baixo valor de perdas económicas, representando cerca de 0.63% (Figura 6.5).

Vale ressaltar que as perdas referidas no presente estudo se referem apenas àquelas relacionadas com os danos aos edifícios, sem contar com as perdas das infraestruturas, perdas humanas, efeitos da liquefação, etc.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

O estudo desenvolvido em sede da presente dissertação levou a uma ideia inicial sobre o risco sísmico de edifícios residenciais em Angola, evidenciado somente pelas potenciais perdas económicas esperadas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos. Para o seu alcance foi necessário o desenvolvimento de modelos sísmicos indispensáveis para a determinação do risco sísmico, tais como a perigosidade, exposição e vulnerabilidade sísmica.

A insuficiência de dados sobre a história da sismicidade, a localização com precisão aproximada das fontes sísmicas, suas magnitudes e danos efectivos observados bem como a falta de informação sobre a sismicidade por período de cerca de 28 anos, desde 1975 a 2003, fazem com que o resultado do presente estudo esteja associado a algumas incertezas. Por outro lado, a falta de informações sobre a evolução do parque edificado, suas características estruturais e ausência de um censo das construções ou a incorporação de mais informações sobre as características construtivas do parque edificado no censo populacional realizado no ano 2014 permitiu, igualmente, a introdução de incertezas no modelo de exposição criado para o efeito da avaliação do risco sísmico. Não foi possível efectuar um levantamento físico de construções no país, dadas algumas limitações de mobilidade, facto que limitou a possibilidade da definição das curvas de vulnerabilidade para variadas tipologias de classes estruturais.

No desenvolvimento do presente estudo foram feitas várias extrapolações de dados já desenvolvidos para outras regiões do mundo e feitas as devidas adaptações à realidade angolana.

O modelo de perigosidade foi elaborado considerando a informação disponível no modelo de perigosidade criado pelo GEM, (2018) especificamente para África Subsaariana, que disponibiliza os valores do PGA (*Peak Ground Accelerations*). Com a informação foram os dados tratados e obtidas os máximos valores de perigosidade ao nível provincial. A caracterização das unidades geológicas e dos solos permitiu ter uma ideia sobre a velocidade de corte das camadas superficiais a uma profundidade de 30 m (V_{s30}) e o seu efeito nas acelerações do solo em caso de um evento sísmico. Verificou-se que

maior parte do território tem V_{s30} entre 786 a 302 m/s, com excepção da província do Moxico que tem cerca de 1000 m/s. Portanto, o mapa de perigosidade apresentado, (figura 3.6), já têm incorporada a informação sobre os efeitos dos solos. Apresentou-se, igualmente, uma proposta inicial sobre o zoneamento sísmico que pode servir de referência para futuros aspectos normativos sobre a consideração da acção sísmica nos projectos estruturais do país. O país, no geral, apresenta uma baixa perigosidade com PGA mais alto de 0.11 m/s^2 , que com base na classificação propostas por vários autores, pode ser considerada de fraca à moderada, uma vez que se considera de perigosidade alta regiões com PGA igual ou acima de 0.25 m/s^2 .

O modelo de exposição foi criado com base nos dados do censo populacional, realizado em 2014, seguindo a metodologia utilizada para a criação do modelo de exposição dos países Andinos. A metodologia usada é simples e flexível, tendo permitido a determinação do número de edifícios, custos de reposição com base em dados do número de moradias (agregados familiares) e da população. O modelo contém informação sobre o número da população, moradias, edifícios e custos de reposição, distribuída pelas 18 províncias do país e segregadas nas áreas urbana e rural. O modelo possui igualmente informação sobre os locais e respectiva população mais exposto à eventos sísmicos. Com a sobreposição da informação sobre a exposição à perigosidade, foi possível verificar a quantidade de edifícios e suas respectivas classes estruturais expostos à vários níveis de perigosidade. O estudo permitiu aferir que o país tem mais de 50% do seu parque edificado coberto com edifícios de adobe e alvenaria não reforçada (MUR+ADO), conhecidas como classes altamente vulneráveis às acções sísmicas. Os edifícios em betão armado, que apresentam melhor resposta às acções sísmicas, dependendo do grau de pormenorização da armadura em especial nos nós de ligação, cobrem não mais do que 3% do total do parque edificado. Há igualmente um elevado número de edifícios associados à classe dos desconhecidos (UNK), cuja capacidade de resposta à acção sísmica não é conhecida.

O modelo de vulnerabilidade permitiu-nos conhecer o grau de fragilidade das principais classes estruturais de edifícios do país. Recorreu-se às bases de dados do GEM para a obtenção das curvas de fragilidades tipologias, com base nas curvas desenvolvidas em países, em especial os da América Latina, cujas características construtivas, em especial as de alvenaria e betão armado apresentam algumas semelhanças. Por outro lado, as curvas de fragilidade foram igualmente obtidas das bases do GEM e Estas funções permitiram chegar aos valores de rácios de perdas. Chegou-se a conclusão de que, para maior parte do parque edificado, existem índices de perdas elevados dada a fragilidade do tipo estrutural (MUR+ADO) e UNK. Estas classes potenciam os maiores níveis de perdas económicas esperadas para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e um período de retorno de 475 anos.

O risco sísmico permitiu chegar a uma estimativa das perdas económicas esperadas, com base no valor económico das construções, determinadas a partir do custo de reposição, considerando a quantidade de edifícios e suas respectivas classes de vulnerabilidade expostos à níveis de perigosidade. Não se efectuou, neste estudo, a determinação da Perdas Anuais Médias (*Average Annual Loss*), e a probabilidade de excedência nem o rácio de custo-benefício, dada a insuficiência de informação atrás referida. Estima-se, portanto, que com base no censo populacional de 2014, o país apresenta um total de USD 693 milhões de perdas esperadas, tendo como maior fracção os edifícios de alvenaria não confinada e adobe, seguidos dos edifícios alocados na classe dos desconhecidos.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para desenvolvimentos futuros, sugere-se:

- A realização de estudo mais aprofundado sobre a história da sismicidade, consultando os repositórios das universidades, instituições ligadas ao controlo de meteorologia tanto de Portugal como de Angola para tentar obter informações sobre os eventos sísmicos mais antigos e os reais danos causados, de forma a permitir, usando, por exemplo, a metodologia do PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*), a determinação do modelo de perigosidade do país com informação mais precisa;
- A realização de encontros entre a classe de especialistas ligada à arquitectura, engenharia e construção do país, de forma a discutir sobre as principais tipologias construtivas do parque edificado, suas características estruturais e, por fim, a proposta de classes de edifícios com base nos sistemas de resistência lateral;
- Um levantamento físico de amostras das principais classes de edifícios, seus sistemas estruturais, materiais empregados, anos de construção, para permitir a determinação dos principais índices de vulnerabilidade representativa, de forma a facilitar o entendimento em futuros estudos sobre o risco causado pela acções de catástrofes naturais, em especial dos eventos sísmicos;
- Pese embora, com base no estudo realizado, se concluísse que o país tem um risco sísmico que pode ser considerado baixo, é necessário, com os modelos de perigosidade, exposição e vulnerabilidade com o mínimo de incertezas possível, realizar outros estudos sobre o risco sísmico, de forma a permitir o planeamento de medidas de mitigação dos efeitos causados pela acção sísmica.

Assim, ainda que com as incertezas associadas, acredita-se que o presente trabalho possa contribuir no desenvolvimento de futuros estudos para comunidade académica e profissional, sendo que fica o disponível para melhorias.

BIBLIOGRAFIA

ALEXANDER, Confronting catastrophe, 2000

AHMED, Y. E.- Seismic Design of Buildings to Eurocode 8, 2009

AMPONSAH, P., Leydecker, G. & Muff, R., 2012. Earthquake catalogue of Ghana for the time period 1615–2003 with special reference to the tectono-structural evolution of south-east Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 75, pp. 1-13

AMBROSE, N. N.; ADAMS, R. D. Reappraisal of major African earthquakes, south of 20°N, 1900–1930. In: *Natural Hazards*. [s.l.] Springer, v. 4p. 389–419, 1991.

AMR, S. Elnashai, Di Sarno, Luigi, 2008 – *Fundamentals of Earthquake Engineering*, pp. 34, 35 e 36.

ARAÚJO, A. G.; Perevalof, O. V.; Jukov, R. A. (1988). *Carta Geológica de Angola à Escala 1:1.000.000 e Notícia Explicativa*. Instituto Nacional de Geologia. Angola.

ATC – 40, Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume 1, California Seismic Safety Commission, Califórnia, November 1996 (ATC-40)

ATHMANI, AE, Gouasmia, A.; Ferreira, T.M., Vicente, R. and Khemis, A. (2014) Seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings located in Annaba city (Algeria) using non ad-hoc data survey. *Bull Earthq Eng*. doi: 10.1007/s10518014-9717-7.

ATKINSON, G., Boore, D., (2006) - Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America. *Bull Seismol Soc Am* 96:2181–2205

BARBAT, A.H., Carreño, M.L., Pujades, L.G., Lantada, N., Cardona, O.D., Murulanda, M.C., (2010) Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area. *Struct Infrastruct Eng* 6(1–2):17–38

BENDER, B., Perkins, D.M., 1987 – Seisrisk III: a computer program for seismic hazard estimation. *US Geological Survey Bulletin* 1972.

BONDO, Hortêncio Felisberto de Fátima - Litoestratigrafia e modelo sedimentar da Bacia do Cuanza (NW de Angola). 2014. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Universidade do Porto, Porto, 2014

Bozorgnia, Yousef & Bertero, Vitelmo – *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-based Engineering*, 2015.

Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., and Silva, V., 2013. GEM Building Taxonomy Version 2.0, GEM Technical Report 2013-02 V1.0.0, 188 pp., GEM Foundation, Pavia, Italy, doi: 10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02.

- Caicedo C, Barbat AH, Canas JA, Aguiar R (1994) Vulnerabilidad sísmica de edificios, Monografía CIMNE IS-6. Barcelona
- Calderon, A, Silva,V (2018) Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica
- Calvi, G.M.; Pinho, R.; Magenes, G.; Bommer, J.J.; Restrepo-Vélez, L.F. and Crowley, H. (2006) Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET J Earthq Technol* 43:75–104.
- CALVI, G.M. “A Displacement-Based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 411-438. 1999.
- Cardona, O.D. Ordaz, M.G., Arámbula, S., Yamín, L.E., Mahul, O. and Ghesquiere, F. (2006) “Detailed earthquake loss estimation model for comprehensive risk management”, *Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, European Association of Earthquake Engineering EAEE, Geneva;
- Cardona, O.D. (2001) Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Universidade Politécnica de Catalunya. PhD Thesis, Barcelona, Spain
- Carreno, ML, Cardona, O.D, Barbat, AH (2012) New Methodolgy for urban seismic risk assessment from holistic perspective
- Carvalho, C. (2007). Anexo Nacional do Eurocódigo 8 - Consequências para o dimensionamento em Portugal. *Sismica 2007 - 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica* (pp. 47-62). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Chopra
- Catalina Yepes-Estrada,a) M.EERI, Vitor Silva,a) Jairo Valcárcel,a) Ana Beatriz Acevedo,b) Nicola Tarque,c) Matías A. Hube,d) M.EERI, Gustavo Coronel, and Hernán Santa Maríad) - Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment, Outubro 2015
- Chester K (2001) The 1755 Lisbon earthquake. *Prog Phys Geogr* 25(3):363–383
- Coburn AW, Spence R (2002) *Earthquake protection*. Wiley, Chichester, England
- CORNEL, C.A., 1968 – Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am* 58, 1583 – 1606.
- Costa, Sandra Marisa da Silva. Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica do Parque Edificado da Avenida Dr. Lourenço Peixinho - Aveiro. Tese de Mestrado, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- Costa, Joaquim Vieira Botelho et al, 1968 – Carta Generalizada dos Solos de Angola – 3ª Aproximação – Missao de Pedologia de Angola e Mocambique e Centro de Estudos de Pedologia Tropical, Lisboa, 1968

- Crowley H, Colombi M, Crempien J, Erduran E, Lopez M, Liu H, Mayfield M, Milanesi M (2010) GEM1 seismic risk report: part 1, GEM technical report 2010–5. GEM Foundation, Pavia
- Crowley, Helen, Miriam Colombi, Barbara Borzi, Mauro Onida, Fabrizio Meroni, Rui Pinho - Deriving vulnerability curves using Italian earthquakedamage data, 2008.
- Danciu L, Monelli D, Pagani M, Wiemer S (2010) GEM1 hazard: review of PSHA software, GEM technical report 2010–2. GEM Foundation, Pavia
- Decreto Lei 03/07 de Janeiro de 2007
- Decreto Presidencial 90/18 de 09 de Abril
- FREEDMAN, D.A., 1997 – Some issues in the Foundation of statistics. In: Van Fraassen, B.C., (Ed), topics in the foundation os statistics. Springer, Netherlands, pp. 19-39.
- GASPERINI, P., Lolli, B., Vannucci, G., 2013 – Empirical calibration of the local magnitude data sets versus moment-magnitude in Italy. Bull. Seismol. Soc. Am. 103, 2227-2246.
- GELLER, R.J., 1997 – Earthquake prediction: a critical review. Geophys. J. Int. 131, 425-450
- GELLER, R.J., 2011 – Shake-up time for japanese seismology. Nature 472, 407 - 409.
- Geller, R.J., Kanamori, H. 1977 – Magnitudes of great shallow earthquakes from 1904 to 1952. Bull. Seismol. Soc. Am. 67, 587 - 598
- Geophys., Vol. 168 (1-2), 2011, p. 11-25.
- GEM, Press Release, 15/05/2019, John Schneider, GEM Secretary General, Marco Pagani, Hazard Team Leader, Vitor Silva, Risk Team Leader, Paul Henshaw, IT Team Leader
- GNDT-SSN (1994) Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo e secondo livello (murata e cemento armato). Grup. Naz. per la Dif. dai Terremoti, Roma (Itália). [
- GIARDINI, D. 1999. The global seismic hazard assessment program (GSHAP). Annali di Geofisica, 42, 957 - 974.
- GUTENBERG, B., Richter, C.F., 1956 – Magnitude and energy of earthquakes. Am. Geophys. 9, 1-15 (republished in Annals of Geophysics, 53, 7-12, 2010).
- HANKS, T.C., Cornell, C.A., 1994 – Probabilistic seismic hazard analysis: a beginner’s guide. In: Fifth symposium on issues related to nuclear power plant structures, equipmet and piping. Dec. 14-16, 1994, Lake Buena Vista, Florida, USA.

KANAMORI, H., Anderson, D.L., 1975 – Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull. Seismol. Soc. Am 65, 17073-1095.

Jornal de Angola, edição 18 de Janeiro de 2017.

Jaiswal, K., Wald, D., and Porter, K., 2010. A global building inventory for earthquake loss estimation and risk management, Earthquake Spectra 26, 731–748.

KAGAN, Y.Y., 1997 – Are earthquakes predictable? Geophys. J. Int. 131, 505-525.

KAGAN, Y.Y., 2014 – Earthquakes: models, statistics, testable forecasts. American Geophysical Union, Washington DC.

KAPPOS, A.J., et al. “Development of Seismic Risk Scenarios Based on a Hybrid Method of Vulnerability Assessment”, Natural Hazards, Vol. 17, No. 2, pp. 177- 192. 1998.

Kramer S (1996) Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, New Jersey

Lagomarsino S, Giovinazzi S (2006) Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. Bull Earthq Eng 4:415– 443. doi: 10.1007/s10518-006-9024-z.

LINDEBURG, M. R.; MCMULLIN, K. M. Seismic Design of Building Structures: A professional's Introduction to Earthquake Forces and Design Details. 9th ed. Belmont: Professional Publications, Inc., 2008.

LINDEBURG, M. R.; MCMULLIN, K. M. Seismic Design of Building Structures: A professional's Introduction to Earthquake Forces and Design Details. 9th ed. Belmont: Professional Publications, Inc., 2008.

MAIN, I., (moderator), 1999 – Is the reliable prediction of individual earthquakes a realistic scientific goal? Nature's debates, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquakes>

MARQUES, M. M. (1977) – Esboço das grandes unidades geomorfológicas de Angola (2ª aproximação), Inst. Inv. Cient. Tropical, Garcia de Orta, Sér. Geol., Lisboa, 2(1), pp.41-43

McGUIRE, R.K., 1976 – Fortran computer program for seismic risk analysis. US Geological Survey open-file, report 76-76.

McGUIRE, R.K. (2004) Seismic hazard and risk analysis, EERI Monography. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA

MIRANDA, Paulo de Souza Tavares em “Avaliação da vulnerabilidade sísmica na realidade predial brasileira /Paulo de Souza Tavares Miranda.- Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013.

- MIRANDA, Raul de. (1948) – A sismicidade das duas colónias portuguesas (Angola e Moçambique) no ano de 1945 – Tipografia da Atlântida, Coimbra, pp. 3-9
- MOREIRA, A., COLLIGNON M., RODRIQUES B., PEREIRA, E., et al (1977) – Reconhecimento científico de Angola – Estudos de Geologia, de Paleontologia e de Micologia – Publicações do II Centenário da Academia de Ciências de Lisboa.
- MUIR-WOOD, R., 1993 – From global seismotectonics to global seismic hazard. *Am. Geophys.* 36, 153-168.
- NETO, Francisco António Pereira. Estudo da sismicidade natural de Angola e desencadeada no Médio Kwanza. 2014. xiv, 134 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- ORSINI, G. “A Model for Buildings’ Vulnerability Assessment Using the Parameterless Scale of Seismic Intensity (PSI)”, *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 3, pp. 463-483. 1999.
- Pezeshk S, Zandieh A, Tavakoli B (2011) Hybrid empirical ground-motion prediction equations for eastern North America using NGA models and updated seismological parameters. *Bull Seismol Soc Am* 101:1859–1870
- Poggi, V., Durrheim, R., Mavonga Tuluka, G., Weatherill, G., Gee, R., Pagani, M., Nyblade, A., Delvaux, D., 2017. Assessing Seismic Hazard of the East African Rift: a pilot study from GEM and AfricaArray. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi:10.1007/s10518-017-0152-4.
- Ricardo, R.P, Raposo, J.A & Madeira, M., 2005. Estudos dos solos de Angola pelo ISA e pelo IICT. Contribuição para a Ciência do Solo Tropical
- PROENÇA, J. M. “Avaliação de Vulnerabilidade Sísmica de Instalações Hospitalares”. In: Ciclo de Palestras da FCT/UNL e UNIC – 7 de Maio de 2004, Portugal. Palestra...Portugal.
- RODRIGUES, H. F. P. Comportamento Sísmico de Edifícios irregulares de betão armado 2006. 17 f. Proposta de Doutoramento (Engenharia Civil) - Universidade de Aveiro - Portugal.
- ROSSETO, T.; ELNASHAI, A. “Derivation of Vulnerability Functions for European- Type RC Structures Based on Observational Data”, *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 10, pp. 1241-1263. 2003.
- SABETTA, F., et al. “Empirical Fragility Curves from Damage Surveys and Estimated Strong Ground Motion”, *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France, pp. 1-11. 1998.
- SCAWTHORN, C., et al. “Seismic Damage Estimation for Low- and Mid-Rise Buildings in Japan”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 9, No. 2, pp. 93-115. 1981.

- Scawthorn, Charles – A Brief History of Seismic Risk Assessment – Kyoto University, Kyoto, Japan
- SHINOZUKA, M., et al. “Advances in Earthquake Loss Estimation and Application to Memphis, Tennessee”, *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 4, pp. 739-758. 1997.
- Silva, A. F. (1974) – Nota prévia sobre o Geossinclinal Eburneano assinalado na região de Caluquembe (Angola), *Mem. Serv. Geol. Min. Angola*, Luanda, 13, 10 pp
- Silva, Vitor e Calderon, Alejandro, 2018 - “Probabilistic Seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica,
- Silva, Victor, Helen Crouley, Varum, Humberto & Rui Pinho – Seismic Assessment for mainland Portugal – 2014.
- SOLOMOS, G., Pinto, A., Dimova, S., 2008 – A review of the seismic hazard zonation in national building codes in the contexto of EUROCODE 8. European Comission Joint Research center, report EUR 23563 EN.
- SOUSA, Maria - Dissertação para obtenção de grau de Mestre, Instituto Superior Técnico (IST), Julho de 2006.
- SPENCE, R., et al. “Correlation of Ground Motion with Building Damage: The Definition of a New Damage-Based Seismic Intensity Scale”, *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, Vol. 1, pp. 551-556. 1992.
- UTSU, T., Ogata, Y., Matsu'ara, R.S., 1995 – The centenary of the Omori formula for decay law of the aftershock activity. *J. Phys. Earth* 43, 1-33.
- VICENTE, R. (2008) Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. PhD Dissertation. Dept. of Civil Engineering of the University of Aveiro.
- VICENTE, R. S. 2008. Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Tese de Doutoramento da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Villar – Veja – “SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT FOR THE RESIDENTIAL BUILDING STOCK IN SOUTH AMERICA (Villar-Vega, M., 2014)”
- Yepes-Estrada, C., and Silva, V., 2017. Probabilistic seismic risk in South America for the residential building stock, *Proceedings 16th World Conference on Earthquake Engineering*, 9–13 January 2017, Santiago, Chile.
- Wang, Z. – "Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives", *Pure Appl.*

WEN-I LIAO, CHIN-HSIUNG LOH and KEH-CHYUAN TSAI, 2006 - Study on the Fragility of Building Structures in Taiwan - Natural Hazards (2006) 37:55–69

REFERÊNCIAS WEB

[https://books.google.pt/books?id=-br7MuVFKesC&pg=SA1-PA2&lpg=SA1-PA2&dq=Housner+\(1984\)+book&source=bl&ots=hTLCfbY5zH&sig=ACfU3U0rHLKblieANd0pCSYh1aZVYxDpig&hl=pt-PT&sa=X&ved=2ahUKEwiQmv7lvOHjAhWCoXEKHe9qCHUQ6AEwFXoECAsQAQ#v=onepage&q=Housner%20\(1984\)%20book&f=false](https://books.google.pt/books?id=-br7MuVFKesC&pg=SA1-PA2&lpg=SA1-PA2&dq=Housner+(1984)+book&source=bl&ots=hTLCfbY5zH&sig=ACfU3U0rHLKblieANd0pCSYh1aZVYxDpig&hl=pt-PT&sa=X&ved=2ahUKEwiQmv7lvOHjAhWCoXEKHe9qCHUQ6AEwFXoECAsQAQ#v=onepage&q=Housner%20(1984)%20book&f=false)

<https://www.globalquakemodel.org/africa-model-release>

<https://maps.openquake.org/map/global-seismic-risk-map/#5/-10.393/14.054>

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>

<https://hazard.openquake.org/gem/models/WAF/>

<https://www.ine.gov.ao/publicacoes/populacao-e-sociedade>

<https://platform.openquake.org/taxtweb/>

<https://platform.openquake.org/fragility>

<https://platform.openquake.org/vulnerability>

<http://www.angolaconsulate-ca.org/v2/geografia>

https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Versao-simplificada-da-Carta-Generalizada-dos-Solos-de-Angola-4-a-Aproximacao_fig1_261413826