



**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Escola Politécnica**  
**Programa de Projeto de Estruturas**

Felipe de Vasconcelos Alves

**ESTUDO DE SISMICIDADE DO BRASIL PARA REVISÃO DA ABNT NBR  
15421**



UFRJ

Felipe de Vasconcelos Alves

ESTUDO DE SISMICIDADE DO BRASIL PARA REVISÃO DA ABNT NBR 15421

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientador:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Rio de Janeiro

2020

Alves, Felipe

Estudo de sismicidade do Brasil para revisão da ABNT NBR 15421 / Felipe Alves – 2020.

175.: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2020.

Orientador: Sergio Hampshire de Carvalho Santos

1. Sismicidade brasileira, 2. Mapa de ameaça sísmica, 3. Espectro de Resposta. I. Santos, Sergio Hampshire de Carvalho II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III. Título.



UFRJ

ESTUDO DE SISMICIDADE DO BRASIL PARA A REVISÃO DA ABNT  
NBR 15421

Felipe de Vasconcelos Alves

Orientador:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

---

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc., UFRJ

---

Prof. Fernando Rebouças Stucchi, D. Sc., USP

---

Prof. João Carlos Dourado, D. Sc., UNESP

---

Prof. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega, D. Sc., UFRN

Rio de Janeiro  
2020

## AGRADECIMENTOS

A Deus, amigo e parceiro de jornada, pela inspiração de ser melhor a cada dia.

Aos meus pais, Patrícia e Alexandre, e a minha irmã, Rachael, meus primeiros professores, pelo carinho e aprendizado desde o começo da minha vida.

À minha esposa Manoela, minha companheira de todos os dias, pelo amor e dedicação à nossa família, que criou condições para viabilizarmos este trabalho em meio a tantos contratempos.

Ao meu filho, Téo, meu pequeno professor, com quem reaprendo todos os dias a enxergar a vida com os olhos curiosos de criança.

Aos meus amigos da Igreja Batista do Caminho, que ajudaram a forjar minha visão de mundo e a construir uma vida cristã relevante para a sociedade.

A todos os meus mestres que ajudaram a construir meu conhecimento acadêmico e profissional até esta etapa.

Ao meu orientador e mestre, Professor Sérgio Hampshire, por ter me apresentado a este instigante tema, pelo seu apoio, paciência e confiança para escrever sobre ele.

À Marinha do Brasil, na pessoa dos Diretores, Vice-Diretores e demais Oficiais da Diretoria de Obras Cíveis da Marinha, que me permitiram usar parte do meu tempo a fim de me dedicar aos estudos.

Aos meus chefes e colegas de trabalho, com quem passo boa parte do meu tempo, pelos seus ouvidos atentos às minhas explanações corriqueiras sobre este tema e pelos conhecimentos de Engenharia e de vida passados a mim ao longo destes anos juntos.

## RESUMO

ALVES, Felipe de Vasconcelos. **Estudo de Sismicidade do Brasil para Revisão da ABNT NBR 15421**. Rio de Janeiro. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2020.

Este trabalho apresenta um estudo da sismicidade brasileira através da análise probabilística de ameaça sísmica do Brasil, calculada com o programa R-CRISIS versão 20.1. Primeiro, dois trabalhos anteriores sobre o assunto foram reprocessados e as diferenças e similaridades com os resultados originais investigados. A partir destes modelos criados, foram feitos estudos comparativos de alguns parâmetros do R-CRISIS, como a discretização da malha de cálculo, a velocidade  $V_{s30}$ , os modelos de previsão de movimento do solo (GMPM) embutidos no programa, entre outros. Estes parâmetros foram testados em diferentes condições de sismicidade, formas de áreas-fontes sísmicas e períodos de estrutura, o que permitiu que fosse verificada a influência de cada um nos resultados. Após entender melhor todo o processo nas etapas anteriores, procedeu-se a análise probabilística de ameaça sísmica do Brasil, tomando como base as áreas-fontes e as relações de Gutenberg-Richter concebidas por DOURADO (2014), porém lançando mão de GMPM híbridos concebidos neste trabalho. Em seguida, os mapas de ameaça sísmica e espectros de ameaça uniforme resultantes são comparados aos da ABNT NBR 15421 - Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento e as diferenças observadas baseiam três propostas de atualização da mesma: mudança no formato do espectro; mudança do zoneamento sísmico do Nordeste; e criação de uma nova zona sísmica no norte do Mato Grosso.

Palavras-chave: mapa de ameaça sísmica, espectro de resposta, sismicidade brasileira, GMPE, região intraplaca, PSHA.

## ABSTRACT

ALVES, Felipe. **Brazil's Seismicity Study for the ABNT NBR 15421 revision**. Rio de Janeiro. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2020.

This thesis presents a study on the Brazilian seismicity through the probabilistic seismic hazard analysis of Brazil, processed by the software R-CRISIS version 20.1. First, two past works on the subject were reprocessed and their differences and similarities with the original results were investigated. Comparative studies of some R-CRISIS parameters such as: discretization of area sources,  $V_{s30}$  velocity, built-in Ground Motion Prediction Models (GMPE) and others were proceeded. These various parameters were tested under different seismicity conditions, different seismic area source's shapes and different structural periods, what allowed to acknowledge the influence of each one of them in the results. After better understanding the whole process, the probabilistic seismic hazard analysis of Brazil was proceeded, availing the area sources and their respective Gutenberg-Richter relationships conceived by DOURADO (2014), as well as two hybrid GMPE's conceived in this work. Then, the resulting hazard maps and the uniform hazard spectra were compared to the Brazilian standard's (ABNT NBR 15421:2006 - Design of earthquake resistant – Procedure) map and spectrum and the observed differences substantiated three update proposals of it: a change in the spectrum shape; a change in the Northeast's seismic zonation; the creation of a new seismic zone in the north of Mato Grosso state.

Keywords: seismic hazard map, response spectra, Brazilian seismicity, GMPE, intraplate region, PSHA.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Revisão bibliográfica.....	2
1.2. Objetivos .....	5
1.3. Escopo do Trabalho.....	5
2. CONCEITOS BÁSICOS DE SISMOLOGIA .....	7
2.1. Ondas Sísmicas.....	7
2.1.1. Onda Primária ou Onda P.....	7
2.1.2. Onda Secundária ou Onda S.....	8
2.1.3. Onda de Rayleigh .....	8
2.1.4. Onda de Love.....	8
2.2. Estrutura interna da Terra.....	9
2.2.1. Crosta Terrestre .....	9
2.2.2. Manto.....	10
2.2.3. Núcleo.....	10
2.3. Teoria da Tectônica de Placas .....	11
2.4. Origem dos sismos .....	13
2.4.1. Falha Normal .....	15
2.4.2. Falha Inversa.....	15
2.4.3. Falha Transcorrente .....	15
2.5. Escalas de Sismos.....	15
2.5.1. Escalas de Intensidade .....	16
2.5.2. Escalas de Magnitude .....	16
3. ANÁLISE DA AMEAÇA SÍSMICA .....	18
3.1. Análise Probabilística da Ameaça Sísmica .....	18
3.1.1. Identificação das fontes sísmicas.....	19
3.1.2. Caracterização da distribuição das magnitudes.....	21
3.1.3. Caracterização da distribuição das distâncias.....	24
3.1.4. Escolha do modelo de previsão de movimentos do solo.....	25
3.1.5. Cálculo da curva de ameaça sísmica .....	28
3.1.6. Distribuição probabilística de terremotos no tempo.....	29
3.1.7. Espectro de Ameaça Uniforme.....	31
3.2. Análise Determinística da Ameaça Sísmica.....	32

3.3.	Incertezas.....	33
3.3.1.	Incerteza Epistêmica.....	33
3.3.2.	Incerteza Aleatória.....	33
4.	R-CRISIS.....	34
4.1.	Inserção de mapas e cidades.....	34
4.2.	Inserção da malha de cálculo.....	35
4.3.	Geometria da fonte sísmica.....	36
4.4.	Sismicidade da fonte sísmica.....	38
4.5.	Escolha do Modelo de Previsão de Movimento do Solo (GMPPM).....	39
4.6.	Configuração das ordenadas espectrais.....	42
4.7.	Configuração dos parâmetros globais.....	43
4.8.	Definição dos arquivos de saída.....	45
4.9.	Processamento e resultados.....	47
5.	REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES.....	50
5.1.	Fernanda Cristina Moreira da SILVA (2009).....	50
5.2.	Rafael Henrique Moreira da SILVA (2018).....	51
5.3.	Processamento com R-CRISIS.....	52
5.3.1.	Locais de interesse e pontos críticos.....	53
5.3.2.	Geometria da fonte sísmica.....	53
5.3.3.	Sismicidade da fonte sísmica.....	54
5.3.4.	GMPPM.....	54
5.3.5.	Ordenadas Espectrais.....	55
5.3.6.	Parâmetros globais.....	56
5.4.	Comparação de resultados.....	56
5.5.	Discussão sobre os resultados.....	62
6.	ESTUDOS DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROGRAMA R-CRISIS.....	64
6.1.	Estudo de variação da distância máxima de integração.....	64
6.2.	Estudo de variação do <i>Sigma Truncation</i> .....	65
6.3.	Estudo de variação do número de magnitudes.....	68
6.4.	Estudo de variação da discretização da malha de cálculo.....	70
6.5.	Estudo de variação da faixa de aceleração espectral.....	73
6.6.	Estudo de variação da velocidade $V_{s30}$ .....	81
6.7.	Estudo de variação das dimensões da fonte sísmica.....	84
6.8.	Estudo com diferentes GMPPM.....	87

6.8.1.	Sismicidade das Fontes Sísmicas .....	87
6.8.2.	GMPM.....	88
6.8.3.	Ordenadas Espectrais.....	89
6.8.4.	Parâmetros Globais.....	89
6.8.5.	Resultados da comparação de GMPM.....	90
6.9.	Formulação de GMPM Híbridos para o Brasil .....	93
7.	ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA AMEAÇA SÍSMICA DO BRASIL .....	101
7.1.	Pontos de interesse .....	102
7.2.	Geometria das fontes sísmicas .....	102
7.3.	Sismicidade das fontes sísmicas.....	108
7.4.	GMPM.....	108
7.5.	Ordenadas Espectrais .....	108
7.6.	Parâmetros Globais.....	109
7.7.	Resultados .....	110
7.8.	Estudo da sismicidade da região do Acre.....	114
7.9.	Discussão dos Resultados.....	117
7.9.1.	Discussão de resultados da Região Sudeste .....	117
7.9.2.	Discussão de resultados da Região Nordeste .....	117
7.9.3.	Discussão de resultados do Mato Grosso .....	118
7.9.4.	Discussão de resultados da região Centro-Oeste e do Amazonas .....	119
7.9.5.	Discussão sobre o Estudo da região do Acre.....	119
7.9.6.	Observações gerais sobre os resultados.....	120
8.	PROPOSTAS DE ATUALIZAÇÃO DA ABNT NBR 15421 .....	121
8.1.	Zoneamento sísmico da região Nordeste e do Mato Grosso .....	121
8.2.	Formato do Espectro de Resposta de Projeto.....	123
9.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	132
9.1.	Conclusões.....	132
9.2.	Sugestões de Trabalhos Futuros .....	133
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	135
11.	SÍTIOS DA INTERNET .....	143
12.	ANEXOS.....	144
12.1.	Tabelas de acelerações horizontais e Espectro de Ameaça Uniforme por Região .....	144
12.1.1.	Sudeste.....	144

12.1.2. Nordeste.....	147
12.1.3. Mato Grosso .....	152
12.1.4. Centro-Oeste.....	153
12.1.5. Amazonas .....	154

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Movimento das partículas no meio elástico devido a propagação das ondas P, S, de Rayleigh e de Love. Fonte: SUCUOGLU e AKKAR (2014).....	8
Figura 2-2 - Camadas internas da Terra com detalhes de temperatura e pressão por profundidade. Fonte: TOLEDO (2014).....	9
Figura 2-3 - Estrutura interna da Terra, divisão geoquímica e divisão geodinâmica. Fonte: TOLEDO (2014) .....	12
Figura 2-4 - Movimentos relativos convergente e divergente entre placas tectônicas. Fonte: SUCUOGLU e AKKAR (2014). .....	13
Figura 2-5 - Mecanismo de funcionamento da Rebote Elástico.....	14
Figura 2-6 - Tipos de falhas geológicas. Fonte: Adaptado de SUCUOGLU e AKKAR (2014) .....	15
Figura 3-1 - Tipos de fontes sísmicas. Fonte: ALMEIDA (2002).....	20
Figura 3-2 - Divisão da fonte em uma malha e distribuição de probabilidades em função da distância entre ponto de interesse e a fonte. Fonte: ALMEIDA (2002) .....	24
Figura 3-3 - Representação gráfica das diferentes distâncias.....	25
Figura 3-4 – Gráfico da aceleração espectral para $T=0,2$ s e $M=7$ em função da distância e distribuição de probabilidades para as distâncias de 5, 20, 30, 50 e 75 km.....	27
Figura 3-5 - Curva de ameaça sísmica de uma fonte sísmica qualquer em PGA. Fonte: Adaptado de BAKER (2013) .....	29
Figura 3-6 - Espectro de Resposta construído a partir dos valores máximos de aceleração espectral para cada período diferente do sistema oscilatório. ....	31
Figura 3-7 - Espectro de Ameaça Uniforme construído a partir dos valores de aceleração espectral extraídos das curvas de ameaça sísmica para uma dada probabilidade $\gamma$ .....	32
Figura 4-1 - Exemplo de arquivo de texto com dados de entrada das cidades. Número de cidades na primeira linha seguido das informações de cada cidade separadas por vírgula. ....	35
Figura 4-2 - Exemplo da aba GRID OF SITES com destaque para a entrada dos dados da malha de cálculo e de inserção da poligonal. ....	35
Figura 4-3 - Exemplo da aba GRID OF SITES com destaque para inserção do arquivo das cidades e pontos de interesse e para o visualizador do mapa.....	36
Figura 4-4 - Exemplo da aba SOURCE GEOMETRY com destaque para as informações de entrada da fonte sísmica.....	37

Figura 4-5 - Exemplo da aba SOURCE SEISMICITY, com detalhes dos parâmetros inseridos e do respectivo gráfico da relação Gutenberg-Richter. ....	38
Figura 4-6 - Exemplo da aba secundária para escolha de um GMPM embutido no programa, dentro da aba ATTENUATION DATA. ....	40
Figura 4-7 - Exemplo de arquivo formato *.atn com <i>Attenuation Table</i> . ....	40
Figura 4-8 - Exemplo da aba secundária para inserção de novo GMPM através de uma <i>Attenuation Table</i> . ....	41
Figura 4-9 - Exemplo da aba ATTENUATION DATA, com destaque para atribuição de GMPM à fonte sísmica. ....	41
Figura 4-10 - Exemplo da aba SPECTRAL ORDINATES. ....	42
Figura 4-11 - Exemplo da aba GLOBAL PARAMETERS. ....	44
Figura 4-12 - Exemplo da aba SET OUTPUT FILES. ....	46
Figura 4-13 - Exemplo da aba VALIDATE AND RUN, com destaque para os avisos. ....	47
Figura 4-14 - Exemplo da aba VALIDATE AND RUN, com destaque para os erros. ....	47
Figura 4-15 - Exemplo de Mapa de Ameaça Sísmica com destaque para as cidades, fonte sísmica e a malha de cálculo. ....	48
Figura 4-16 - Exemplo de Mapa de Desagregação para um dado ponto de interesse. ....	48
Figura 4-17 - Exemplo de Curva de Ameaça Sísmica e Espectro de Ameaça Uniforme para um dado ponto de interesse. ....	49
Figura 5-1 – Detalhe do ajuste na área-fonte de SILVA (2018). ....	53
Figura 5-2 - Comparação dos EAU da Região Nordeste, SILVA (2009), T=475 anos. ....	57
Figura 5-3 – Comparação dos EAU da Região Nordeste, SILVA (2009), T=2475 anos. ....	57
Figura 5-4 – Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2009), T=475 anos. ....	58
Figura 5-5 – Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2009), T=2475 anos. ....	58
Figura 5-6 - Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2018), T=475 anos. ....	59
Figura 5-7 - Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2018), T=2475 anos. ....	59
Figura 5-8 – Gráficos de desagregação para o (a) PGA e (b) T=0,04 s na região Nordeste de SILVA (2009). ....	62
Figura 6-1 - Relação de Gutenberg-Richter truncada, em escala semi-log, discretizada com diferentes números de magnitudes: (a) 4; (b) 8; (c) 16; (d) 20; (e) 40. ....	68
Figura 6-2 - Malha de cálculo para diferentes pares de parâmetros de discretização: (a) 11:3; (b) 5:3; (c) 5:4. Fonte: ORDAZ E SALGADO-GÁLVEZ (2019). ....	71

Figura 6-3 – Exemplos de Curvas de Ameaça Sísmica discretizadas linearmente com sete tamanhos de divisão diferentes: (a) 0,050; (b) 0,025; (c) 0,010; (d) 0,005; (e) 0,003; (f) 0,0023; (g) 0,0018. ....	75
Figura 6-4 - Exemplos de Curvas de Ameaça Sísmica discretizadas logaritmicamente com sete combinações de parâmetros diferentes: (a) 0,01:1,0:20; (b) 0,01:0,5:20; (c) 0,01:0,2:20; (d) 0,01:0,1:20; (e) 0,01:0,1:30; (f) 0,01:0,1:40; (g) 0,01:0,1:50. ....	79
Figura 6-5 – Fatores de correção de Rocha Sã para Solo Rígido das acelerações espectrais em função dos períodos estruturais. Fonte: VAN HOUTTE <i>et al.</i> (2011).....	84
Figura 6-6 – Espectros de Ameaça Uniforme para diferentes dimensões de área-fonte, com área original destacada em preto.....	86
Figura 6-7 – Aceleração por área de fonte sísmica para diferentes períodos estruturais. ....	87
Figura 6-8 - Comparação dos EAU dos diferentes GMPM para a Região Nordeste de SILVA (2009).....	90
Figura 6-9 - Comparação dos EAU dos diferentes GMPM para a Região Sudeste de SILVA (2018).....	91
Figura 6-10 - Províncias geológicas da Europa: 1-SCR (a) Escudo, (b) Crosta continental; 2-Crosta Oceânica; 3-ASCR; 4-Zona de Subducção; 5-Atividade sísmica profunda sem subducção; 6-Vulcões ativos ou atividades termais e magmáticas. ....	94
Figura 6-11 - Províncias geológicas do Brasil - Áreas cratônicas ou SCR – Rosa; Bacias intracratônicas - Amarelo; Cinturão de dobramento Brasileiro – Cinza.....	94
Figura 6-12 - Províncias geológicas do mundo. Fonte: USGS (2020).....	95
Figura 6-13 - EAU dos Híbridos 1 e 2 em destaque e os EAU dos GMPM do tipo SCR e ASCR, gerados a partir da Região Sudeste de SILVA (2018). ....	99
Figura 6-14 - EAU dos Híbridos 1 e 2 em destaque e os EAU dos GMPM do tipo SCR e ASCR, gerados a partir da Região Sudeste de SILVA (2018), em escala logarítmica. .	99
Figura 7-1 - Áreas-fontes consideradas por DOURADO (2014).....	101
Figura 7-2 - Detalhe da área-fonte Sul-Sudeste. Fonte: DOURADO (2014).....	103
Figura 7-3 - Detalhe da área-fonte Plataforma Continental. Fonte: DOURADO (2014). ....	104
Figura 7-4 - Detalhe da área-fonte Nordeste 1. Fonte: DOURADO (2014). ....	104
Figura 7-5 - Detalhe da área-fonte Nordeste 2. Fonte: DOURADO (2014). ....	105
Figura 7-6 - Detalhe da área-fonte Centro-Oeste. Fonte: DOURADO (2014). ....	106
Figura 7-7 - Detalhe da área-fonte Mato Grosso. Fonte: DOURADO (2014).....	107

Figura 7-8 - Detalhe da área-fonte Amazonas. Fonte: Adaptado de DOURADO (2014). .....	107
Figura 7-9 - Mapa de ameaça sísmica para o Sudeste para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	110
Figura 7-10 - Mapa de ameaça sísmica para o Nordeste para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	111
Figura 7-11 - Mapa de ameaça sísmica para o Mato Grosso para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	111
Figura 7-12 - Mapa de ameaça sísmica para o Centro-Oeste para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	112
Figura 7-13 - Mapa de ameaça sísmica para o Amazonas para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	112
Figura 7-14 - EAU do Híbrido 2 para a Região Sudeste. ....	113
Figura 7-15 - EAU do Híbrido 2 para a Região Nordeste. ....	113
Figura 7-16 – EAU do Híbrido 1 para a Região do Mato Grosso. ....	113
Figura 7-17 - EAU do Híbrido 1 para a Região Centro-Oeste. ....	114
Figura 7-18 - EAU do Híbrido 2 para a região do Amazonas. ....	114
Figura 7-19 – Comparativo entre o ERP da NBR 15421 (2006) e o EAU do Acre. ....	115
Figura 7-20 - Mapa de ameaça sísmica do IGP na fronteira entre Brasil e Peru, no PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, medido em Gal. ....	116
Figura 7-21 – Mapa de ameaça sísmica de RONCAL CASTRO (2017) para a fronteira entre Brasil e Peru, no PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, medido em g. Fonte: Adaptado de RONCAL CASTRO (2017). ....	116
Figura 8-1 – (a) Detalhe do mapa de ameaça sísmica para região Nordeste 1 (b) Detalhe da proposta de mudança do zoneamento sísmico para o Nordeste, com patamar de 0,050 g em cinza. ....	121
Figura 8-2 - (a) Detalhe do mapa de ameaça sísmica para o Mato Grosso (b) Detalhe da proposta de mudança do zoneamento sísmico para o Mato Grosso, com patamar de 0,075 g em cinza. ....	122
Figura 8-3 - Proposta de zoneamento sísmico brasileiro para a ABNT NBR 15421. ...	122
Figura 8-4 - Gráficos de desagregação de (a) Sudeste, (b) Nordeste e (c) Mato Grosso. .....	124

Figura 8-5 – Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421 (2006), o ERP Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8 (2009) e os EAU (a) do Sudeste, (b) do Nordeste, (c) do Mato Grosso, (d) do Centro-Oeste e (e) do Amazonas. ....	125
Figura 8-6 - Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421 (2006), o ERP Tipo 2 do Eurocódigo 8 (2009) e os EAU das proximidades de Boston e de Washington para aceleração horizontal no PGA de (a) 0,025g e (b) 0,050g. ....	125
Figura 8-7 – Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421 (2006), o ERP Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8 (2009) e os (a) EAU do Acre consultado em site peruano e (b) EAU do oeste dos EUA. ....	126
Figura 8-8 - Proposta de Espectro de Resposta de Projeto para ABNT NBR 15421... ..	128
Figura 8-9 - Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421, o ERP proposto e o EAU (a) do Sudeste, (b) do Nordeste, (c) do Mato Grosso, (d) do Centro-Oeste, (e) do Amazonas e (f) do Acre.....	129
Figura 12-1 - Espectros de Ameaça Uniforme para Cabo Frio, escala logarítmica .....	144
Figura 12-2 - Espectros de Ameaça Uniforme para Itaguaí, escala logarítmica .....	145
Figura 12-3 - Espectros de Ameaça Uniforme para Angra dos Reis, escala logarítmica .....	146
Figura 12-4 - Espectros de Ameaça Uniforme para Ponto Crítico do Nordeste 1, escala logarítmica.....	147
Figura 12-5 - Espectros de Ameaça Uniforme para Ponto Crítico do Nordeste 2, escala logarítmica.....	148
Figura 12-6 - Espectros de Ameaça Uniforme para Fortaleza, escala logarítmica .....	149
Figura 12-7 - Espectros de Ameaça Uniforme para Natal, escala logarítmica.....	150
Figura 12-8 - Espectros de Ameaça Uniforme para João Pessoa, escala logarítmica..	151
Figura 12-9 - Espectros de Ameaça Uniforme para o Ponto Crítico do Mato Grosso, escala logarítmica.....	152
Figura 12-10 - Espectros de Ameaça Uniforme para o Ponto Crítico do Centro-Oeste, escala logarítmica .....	153
Figura 12-11 - Espectros de Ameaça Uniforme para o Ponto Crítico do Amazonas, escala logarítmica.....	154

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5-1 - Vértices da área-fonte ‘Nordeste’ de SILVA (2009).....	50
Tabela 5-2 - Vértices da área-fonte ‘Sudeste’ de SILVA (2009).....	51
Tabela 5-3 - Vértices da área-fonte ‘Zona Terrestre’ de SILVA (2018).....	52
Tabela 5-4 - Vértices da área-fonte ‘Zona Marítima’ de SILVA (2018).....	52
Tabela 5-5 – Resumo dos pontos críticos de SILVA (2009) e SILVA (2018).....	53
Tabela 5-6 – Resumo dos dados de sismicidade de SILVA (2009) e SILVA (2018)....	54
Tabela 5-7 – Resumo das Ordenadas Espectrais para SILVA (2009).....	55
Tabela 5-8 – Resumo das Ordenadas Espectrais para SILVA (2018).....	55
Tabela 5-9 – Resumo dos Parâmetros Globais.....	56
Tabela 5-10 – Acelerações espectrais comparadas da Região Nordeste, SILVA (2009), T=475 anos.....	60
Tabela 5-11 – Acelerações espectrais comparadas da Região Nordeste, SILVA (2009), T=2475 anos.....	60
Tabela 5-12 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2009), T=475 anos.....	60
Tabela 5-13 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2009), T=2475 anos.....	61
Tabela 5-14 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2018), T=475 anos.....	61
Tabela 5-15 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2018), T=2475 anos.....	61
Tabela 6-1 – Acelerações em $g$ para diferentes Distâncias Máximas de Integração e períodos estruturais da Região Nordeste, SILVA (2009).....	64
Tabela 6-2 - Acelerações em $g$ para diferentes Distâncias Máximas de Integração e períodos estruturais da Região Sudeste, SILVA (2009).....	65
Tabela 6-3 - Acelerações em $g$ para diferentes Distâncias Máximas de Integração e períodos estruturais da Região Sudeste, SILVA (2018).....	65
Tabela 6-4- Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes números de desvios padrões e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009).....	66
Tabela 6-5 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes números de desvios padrões e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2009).....	66

Tabela 6-6 – Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes números de desvios padrões e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2018).....	66
Tabela 6-7 - Percentagens em relação ao valor sem truncamento da Região Nordeste de SILVA (2009).....	67
Tabela 6-8 – Percentagens em relação ao valor sem truncamento da Região Sudeste de SILVA (2009).....	67
Tabela 6-9 – Percentagens em relação ao valor sem truncamento da Região Sudeste de SILVA (2018).....	67
Tabela 6-10 – Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes números de magnitude e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009) .....	69
Tabela 6-11 – Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes números de magnitude e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2009) .....	69
Tabela 6-12 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes números de magnitude e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2018) .....	69
Tabela 6-13 – Percentuais em relação aos valores para 40 magnitudes da Região Nordeste de SILVA (2009).....	70
Tabela 6-14 - Percentuais em relação aos valores para 40 magnitudes da Região Sudeste de SILVA (2009).....	70
Tabela 6-15 - Percentuais em relação aos valores para 40 magnitudes da Região Sudeste de SILVA (2018).....	70
Tabela 6-16 – Acelerações em $g$ para diferentes valores de <i>Minimum triangle size e Minimum distance / triangle size ratio</i> .....	72
Tabela 6-17 – Tempos de processamento em segundos para diferentes valores de <i>Minimum triangle size e Minimum distance / triangle size ratio</i> .....	72
Tabela 6-18 - Percentagens em relação à aceleração para o par 0,5:9. ....	72
Tabela 6-19 - Percentagens em relação ao tempo de processamento para o par 0,5:9... ..	72
Tabela 6-20 - Razão entre erro percentual da aceleração e ganho percentual de tempo, com a relação ótima destacada. ....	73
Tabela 6-21 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões lineares e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009).....	75
Tabela 6-22 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões lineares e períodos estruturais da região Sudeste de SILVA (2009).....	76

Tabela 6-23 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões lineares e períodos estruturais da região Sudeste de SILVA (2018).....	76
Tabela 6-24 – Percentagens em relação ao tamanho da divisão de 0,0018 s da Região Nordeste de SILVA (2009).....	77
Tabela 6-25 - Percentagens em relação ao tamanho da divisão de 0,0018 s da região Sudeste de SILVA (2009).....	77
Tabela 6-26 - Percentagens em relação ao tamanho da divisão de 0,0018 s da região Sudeste de SILVA (2018).....	77
Tabela 6-27 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões logarítmicas e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009).....	79
Tabela 6-28 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões logarítmicas e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2009).....	79
Tabela 6-29 - Acelerações em $g$ e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões logarítmicas e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2018).....	80
Tabela 6-30 - Percentagens em relação à combinação mais discretizada da Região Nordeste de SILVA (2009).....	80
Tabela 6-31 - Percentagens em relação à combinação mais discretizada da Região Sudeste de SILVA (2009).....	80
Tabela 6-32 - Percentagens em relação à combinação mais discretizada da Região Sudeste de SILVA (2018).....	81
Tabela 6-33 - Acelerações em $g$ para diferentes $V_{s30}$ e períodos estruturais para a Região Nordeste de SILVA (2009).....	82
Tabela 6-34 - Acelerações em $g$ para diferentes $V_{s30}$ e períodos estruturais para a Região Sudeste de SILVA (2009).....	82
Tabela 6-35 - Acelerações em $g$ para diferentes $V_{s30}$ e períodos estruturais para a Região Sudeste de SILVA (2018).....	82
Tabela 6-36 - Fatores de transposição de acelerações para outras velocidades $V_{s30}$ para a Região Nordeste de SILVA (2009) .....	82
Tabela 6-37 - Fatores de transposição de acelerações para outras velocidades $V_{s30}$ para a Região Sudeste de SILVA (2009) .....	83

Tabela 6-38 - Fatores de transposição de acelerações para outras velocidades Vs30 para a Região Sudeste de SILVA (2018) .....	83
Tabela 6-39 - Coordenadas dos vértices e área das diferentes áreas-fontes .....	84
Tabela 6-40 - Acelerações em g para diferentes períodos e dimensões da área-fonte Mato Grosso de DOURADO (2014) .....	85
Tabela 6-41 - Percentagens em relação à área original para diferentes períodos e dimensões da área-fonte Mato Grosso de DOURADO (2014) .....	85
Tabela 6-42 – Resumo da sismicidade das fontes sísmicas para comparação de GMPM .....	88
Tabela 6-43 - Relação de GMPM testados.....	88
Tabela 6-44 - Resumo das Ordenadas Espectrais para comparação de GMPM. ....	89
Tabela 6-45 - Resumo dos Parâmetros Globais para comparação de GMPM. ....	90
Tabela 6-46 - Comparação das acelerações espectrais, medidas em g, dos diferentes GMPM para a Região Nordeste de SILVA (2009) .....	92
Tabela 6-47 - Comparação das acelerações espectrais, medidas em g, dos diferentes GMPM para Região Sudeste de SILVA (2018) .....	92
Tabela 6-48 - Relação de GMPM utilizados no processamento das regiões brasileiras. 97	
Tabela 6-49 - Resumo da composição dos GMPM híbridos.....	98
Tabela 7-1 – Pontos de interesse das diversas regiões .....	102
Tabela 7-2 - Vértices da área-fonte Sul-Sudeste .....	103
Tabela 7-3 - Vértices da área-fonte Plataforma Continental .....	103
Tabela 7-4 - Vértices da área-fonte Nordeste 1 .....	104
Tabela 7-5 - Vértices da área-fonte Nordeste 2 .....	105
Tabela 7-6 - Vértices da área-fonte Centro-Oeste .....	105
Tabela 7-7 - Vértices da área-fonte Mato Grosso.....	106
Tabela 7-8 - Vértices da área-fonte Amazonas .....	107
Tabela 7-9 – Resumo dos dados de sismicidade das áreas-fontes.....	108
Tabela 7-10 - Resumo das Ordenadas Espectrais para processamento dos Híbrido 1 e Híbrido 2.....	109
Tabela 7-11 - Resumo dos parâmetros globais para o processamento das regiões brasileiras.....	110
Tabela 8-1 - Proposta de alteração da Tabela 1 da ABNT NBR 15421 (2006). ....	123
Tabela 8-2 – Comparativo entre as áreas residuais do ERP ABNT NBR 15421 (2006) e do ERP Proposto.....	129

Tabela 8-3 - Comparativo entre as médias dos resíduos do ERP da ABNT NBR 15421 (2006) e do ERP Proposto .....	130
Tabela 8-4 - Comparativo entre os desvios padrões dos resíduos do ERP ABNT NBR 15421 (2006) e do ERP Proposto .....	130
Tabela 12-1 - Acelerações horizontais para Cabo Frio .....	144
Tabela 12-2 - Acelerações horizontais para Itaguaí .....	145
Tabela 12-3 - Acelerações horizontais para Angra dos Reis.....	146
Tabela 12-4 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Nordeste 1.....	147
Tabela 12-5 - Acelerações horizontais para Ponto Crítico do Nordeste 2.....	148
Tabela 12-6 - Acelerações horizontais para Fortaleza.....	149
Tabela 12-7 - Acelerações horizontais para Natal.....	150
Tabela 12-8 - Acelerações horizontais para João Pessoa .....	151
Tabela 12-9 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Mato Grosso .....	152
Tabela 12-10 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Centro-Oeste.....	153
Tabela 12-11 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Amazonas .....	154

# 1. INTRODUÇÃO

---

A pesquisa na área de sismologia ainda é incipiente e avança a passos curtos no Brasil. Apesar do recente avanço com a instalação da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) e o aumento da capacidade de registro de sismos em todo território nacional, há ainda um lapso grande de conhecimento sobre as características sismológicas do Brasil. Além da dificuldade intrínseca de uma região intraplaca, que é a falta de dados consistentes sobre terremotos, há também um fator cultural de desinteresse da população sobre o assunto e o negligenciamento do problema pelos órgãos públicos, o qual se reflete na falta de uma política de orientação sobre o tema ou ainda na falta de investimentos em pesquisa. Isso pode ser parcialmente explicado pela baixa ocorrência de sismos de grande intensidade com decorrentes eventos catastróficos, o que gera uma falsa impressão de que o Brasil é um país livre de terremotos. Em países em que a frequência de tremores de terra é maior, há uma cultura de prevenção e de reação a desastres também maior, o que diminui o risco da perda de vidas humanas.

O risco de danos em estruturas causados por abalos sísmicos é real e deve ser quantificado a fim de que medidas preventivas possam ser tomadas. A norma brasileira de projeto sísmico de estruturas, a ABNT NBR 15421 – Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento (2006), foi elaborada a fim de atender a esta necessidade da comunidade técnica de engenheiros civis na elaboração de projetos com maiores exigências de segurança. Este documento foi um importante passo a favor da segurança das estruturas, principalmente nas regiões que associam grandes concentrações urbanas e uma maior atividade sísmica, como é o caso dos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte.

Entretanto, como todo documento normativo, a ABNT NBR 15421 (2006) está atrelada aos conhecimentos acumulados até sua publicação. Além das limitações expostas em seu próprio texto, no seu item 1.4, desde 2006, ano de sua publicação, várias informações sobre a sismologia e geologia brasileiras foram atualizadas e divulgadas e merecem ser analisadas para uma futura revisão

Além disso, a previsão da construção de mais instalações nucleares no Sudeste brasileiro, como a Usina Nuclear de Angra 3 e a Base de Submarinos de Propulsão Nuclear da Marinha do Brasil, e os recentes problemas com barragens de rejeitos de

minérios, explicitam uma crescente demanda por uma normatização mais detalhada a fim de proporcionar maior segurança à população.

### **1.1. Revisão bibliográfica**

Um dos primeiros artigos sobre análise da ameaça sísmica em território nacional foi o de BERROCAL *et al.* (1996). Neste trabalho, os autores investigaram a sismicidade do Sudeste brasileiro e conceberam uma relação Gutenberg-Richter para a região, após estudarem diferentes métodos de elaboração deste tipo de função, lançando mão dos dados compilados no livro BERROCAL *et al.* (1984).

ALMEIDA (2002) explanou em sua Tese os critérios necessários para execução de uma análise probabilística de ameaça sísmica, baseados nas recomendações do relatório NUREG/CG-6372, elaborado por BUDNITZ *et al.* (1997). A partir dessas recomendações, das relações de Gutenberg-Richter atualizadas das regiões Sudeste e Nordeste, fornecidas pelo Professor Jesus Berrocal, e da divisão do território brasileiro em cinco províncias sismotectônicas, baseadas no trabalho de BERROCAL *et al.* (1984), a autora desenvolveu uma análise probabilística da ameaça sísmica para treze capitais brasileiras e apresentou a curva de ameaça sísmica para cada uma delas.

A ABNT NBR 15421 – Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento (2006) estabeleceu um zoneamento sísmico e um Espectro de Resposta de Projeto (ERP) para todo o território nacional, destacando uma pequena parte do Nordeste e o oeste do Amazonas e do Acre como principais áreas de atividade sísmica.

Segundo SANTOS e LIMA (2008), o zoneamento sísmico tomou como base o estudo feito pelo GFZ-POTSDAM (1999). Os valores de aceleração horizontal foram verificados através de análises probabilísticas de ameaça sísmica das regiões Nordeste e Sudeste. Para o Nordeste foi usada a relação de Gutenberg-Richter concebida por MARZA *et al.* (2004) e para o Sudeste a mesma relação usada por ALMEIDA (2002). O zoneamento do oeste do Amazonas e do Acre foi definido com base nos trabalhos de MONROY e BOLÁNOS (2005) que fizeram uma análise probabilística de ameaça sísmica do território peruano. Através de comunicação pessoal com os autores por correio eletrônico, foi fornecido pelos mesmos a extensão desta análise para o território brasileiro.

SILVA (2009) fez um levantamento dos dados sísmicos no Brasil e revisou os estudos feitos por SANTOS e LIMA (2008), os quais haviam servido como base na

elaboração da ABNT NBR 15421 (2006). Em seu trabalho, foi usado um procedimento de cálculo manual diferente do anterior e as áreas-fontes sísmicas das regiões Nordeste e Sudeste foram mais bem detalhadas. Esses fatores permitiram um cálculo mais preciso das recorrências sísmicas e das distribuições probabilísticas das acelerações espectrais, quando comparados ao trabalho de SANTOS E LIMA (2008). Os espectros de resposta encontrados, tanto para região Nordeste quanto para a Sudeste, foram compatíveis com os valores estabelecidos pela Norma Brasileira.

Nos últimos anos foram feitos alguns esforços no sentido de atualizar o mapa brasileiro de ameaça sísmica, destacadamente, por DOURADO (2014), PIRCHINER (2014) e ASSUMPÇÃO *et al.* (2016).

DOURADO (2014) elaborou um mapa de ameaça sísmica através de uma análise probabilística desta ameaça, utilizando o programa R-CRISIS. Para proceder à sua análise, o autor estipulou oito áreas-fonte localizadas em diversas regiões do Brasil com atividade sísmica significativa e determinou suas respectivas relações de Gutenberg-Richter, após tratar os dados do catálogo brasileiro de sismos.

PIRCHINER (2014) aplicou uma abordagem diferente na elaboração de mapas sísmicos. Após efetuar uma análise probabilística de ameaça sísmica tradicional, baseado nos dados de DOURADO (2014), utilizando o programa OpenQuake, o autor considerou três métodos distintos de suavização de sismicidade, conhecidos como métodos “*zoneless*”. Os valores de aceleração horizontal obtidos foram de duas a quatro vezes maiores do que os encontrados por DOURADO (2014). Os métodos de suavização investigados apresentaram resultados divergentes entre si, com os maiores valores de aceleração horizontal localizados em pontos diferentes. Apesar dos resultados inconclusivos em relação ao zoneamento sísmico, esse tipo de método se mostrou muito útil na análise sísmica complementando os métodos tradicionais.

ASSUMPÇÃO *et al.* (2016) lançaram mão do método de árvore lógica para conciliar os diferentes aspectos dos modelos por eles considerados, a fim de elaborar um mapa brasileiro de ameaça sísmica. Dois modelos de cálculo foram considerados: modelo de zonas por área e modelo de zonas pontuais suavizadas. Dentro do primeiro tipo, foram utilizados três modelos seguindo o método tradicional de análise probabilística de ameaça sísmica, distinguindo-se entre si somente pelo zoneamento sísmico feito por cada autor. Dentro do segundo tipo, consideraram-se os três modelos de suavização estudados por

PIRCHINER (2014). Para cada um dos seis ramos da árvore lógica foi atribuído um peso percentual, optando-se por uma maior relevância dos modelos de zonas pontuais suavizadas.

SILVA (2018) investigou a sismicidade da região Sudeste, a partir dos novos dados sísmicos considerados por DOURADO (2013), utilizando em sua abordagem os princípios de Análise de Confiabilidade. O autor executou sua análise com auxílio do programa VaP (2017) e obteve como resultado o espectro de resposta da região Sudeste, o qual se mostrou compatível com os valores definidos pela ABNT NBR 15421 (2006).

Em paralelo a isso, novas análises probabilísticas de ameaça sísmica recentes foram feitas para o território peruano, com destaque para RONCAL CASTRO (2017) e AGUILAR *et al.* (2017). Além da elaboração dos mapas de ameaça sísmica atualizados do Peru, tais trabalhos fizeram parte do projeto de criação de um aplicativo de acesso gratuito, o qual, para uma dada localização, fornece: Curva de Ameaça Sísmica, Espectro de Ameaça Uniforme e o Espectro de Resposta de Projeto.

Durante o período final de entrega deste trabalho foram publicados dois trabalhos importantes dentro do campo de análise probabilística de ameaça sísmica. Eles não foram aproveitados nesta dissertação, porém são citados abaixo, pois poderão servir como base de estudos futuros.

DE ALMEIDA *et al.* (2019) executaram a análise probabilística de ameaça sísmica atualizada da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), localizada em Angra dos Reis. Os autores consideraram em sua árvore lógica, não só a contribuição da parte continental e oceânica do Sudeste através do modelo padrão de sismicidade difusa, mas também a contribuição das falhas geológicas próximas ao local estudado. Além disso, foi concebida uma relação de homogeneização entre as escalas de magnitudes  $m_b$  e  $M_w$  e foi usada uma abordagem alternativa na escolha de um GMPM, baseada em diferentes pesos dos ramos da árvore lógica para o mesmo modelo de TORO *et al.* (1997). Como resultado da análise, são obtidos cinco espectros de ameaça uniforme do ponto de interesse para os períodos de recorrência:  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$ .

BORGES *et al.* (2020) executaram a análise probabilística de ameaça sísmica para um ponto de interesse na plataforma continental localizada na Bacia de Campos. Os autores adotaram premissas semelhantes às de ALMEIDA *et al.* (2019), porém não

consideraram as contribuições das falhas geológicas e, apesar de adotar o mesmo conceito de escolha de GMPM, atribuíram pesos diferentes para os ramos da árvore lógica. Ao final, obtiveram-se um mapa de ameaça sísmica para a plataforma continental e quatro espectros de ameaça uniforme do ponto de interesse para períodos de recorrência: 275, 975, 2475 e 4975 anos.

## **1.2. Objetivos**

Dentro do contexto exposto, a fim de contribuir para o conhecimento na área de análise da ameaça sísmica no Brasil, o presente trabalho tem como objetivos:

- 1) Pesquisar dados e ferramentas, tais como a construção de Espectro de Resposta de Projeto e Mapa de Ameaça Sísmica, que ajudem no entendimento de novas informações sobre sismicidade brasileira e que contribuam na avaliação de possíveis revisões da ABNT NBR 15421 (2006);
- 2) Revisar trabalhos anteriores, através do reprocessamento dos dados com o programa R-CRISIS e comparar os resultados obtidos;
- 3) Executar análises probabilísticas de ameaça sísmica para o território brasileiro com auxílio do programa R-CRISIS;
- 4) Identificar e propor possíveis alterações à ABNT NBR 15421 (2006).

## **1.3. Escopo do Trabalho**

De modo a atingir os objetivos supracitados, este trabalho está organizado em nove capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1, além de um panorama da sismologia no Brasil e seus desafios, são apresentados os trabalhos mais relevantes sobre análise de ameaça sísmica no território nacional, além de mostrar como o presente trabalho pretende contribuir para esta linha de pesquisa através da exposição dos seus objetivos.

No capítulo 2, a fim de introduzir o leitor ao estudo da sismologia, é feita uma exposição sobre os seus conceitos básicos mais relevantes para o tema deste trabalho, tais como ondas sísmicas, estrutura interna da Terra, Teoria Tectônica de Placas etc.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia da análise probabilística de ameaça sísmica, detalhando os passos necessários à sua elaboração, além do arcabouço teórico que a sustenta.

No capítulo 4 o R-CRISIS versão 18.4.2.0, programa com o qual se executa a análise probabilística de ameaça sísmica neste trabalho, é descrito. Suas principais funcionalidades, além de informações sobre como proceder sua programação, também são explicados neste capítulo.

No capítulo 5 os trabalhos de SILVA (2009) e SILVA (2018) são revisados através do reprocessamento dos seus dados com o programa R-CRISIS, o que permite a avaliação das diferenças entre os métodos utilizados.

No capítulo 6 é estudada a influência de diferentes parâmetros do R-CRISIS nos resultados obtidos, tais como: discretização da malha, geometria da fonte sísmica, número de magnitudes, funções de atenuação, etc. Estes estudos servem de referência para a escolha dos valores dos parâmetros da análise feita no capítulo posterior. Além disso, ao final do capítulo, são formulados dois modelos de previsão de movimento do solo (*Ground Motion Prediction Model - GMPM*) híbridos para o Brasil.

No capítulo 7 desenvolve-se a análise probabilística da ameaça sísmica brasileira a partir das oito áreas-fontes e de suas respectivas relações de Gutenberg-Richter, estabelecidas por DOURADO (2014). Após a junção desses dados a dois modelos híbridos de previsão de movimento de solo criados, foi possível processar alguns modelos no R-CRISIS e traçar Espectros de Ameaça Uniforme de resposta para algumas regiões e cidades do Brasil.

No capítulo 8 são compiladas as principais discrepâncias observadas entre os resultados do capítulo anterior e a ABNT NBR 15421 (2006). Com base nelas, são propostas algumas alterações no Mapa de Ameaça Sísmica e no Espectro de Resposta de Projeto da norma.

No capítulo 9, finalmente, são tecidas as considerações finais, expondo as principais dificuldades experimentadas, assim como algumas propostas para trabalhos futuros.

## 2. CONCEITOS BÁSICOS DE SISMOLOGIA

---

A curiosidade científica sobre terremotos pode ser mapeada cronologicamente até a Antiguidade, em tratados gregos sobre o assunto, mas somente na segunda metade do século XIX, teorias e instrumentos modernos começaram a dar corpo a um conhecimento científico sobre os abalos sísmicos. A construção de sismógrafos capazes de registrar ondas sísmicas a longa distância, perto da passagem do século XIX para o XX, fez com que as análises qualitativas fossem complementadas por dados quantitativos e se tornassem uma importante ferramenta da sismologia, da análise do interior da terra e da dinâmica dos solos.

### 2.1. Ondas Sísmicas

No começo do século XIX, cientistas e matemáticos como Navier, Cauchy, Poisson e outros estabeleceram a base matemática moderna para o que viria a chamar-se Mecânica dos Sólidos. Em 1828, Poisson chega em resultados matemáticos que indicam a existência de ondas compressivas e ondas cisalhantes que se propagam em sólidos elásticos. Em 1885, Rayleigh também obteve resultados sobre um novo tipo de onda associada a um meio contínuo com uma superfície livre. Entretanto, somente em 1897 esses três tipos de ondas, primárias, secundárias e de Rayleigh, respectivamente, foram observadas na natureza por Oldham, na análise de sismogramas, o que confirmou que o solo, pelo menos durante períodos curtos, se comporta como um corpo elástico. Além desses tipos de onda, ainda se viria a descobrir a existência de um último, em 1911 por Love, ondas de superfície polarizadas transversalmente, chamadas ondas de Love. (histórico adaptado de BEN-MENACHEM, 1995)

Em resumo, há dois tipos de ondas de corpo, a primária e a secundária (P e S) e dois tipos de ondas de superfície, de Rayleigh e de Love (R e L). A Figura 2-1 mostra uma representação dos quatro tipos de ondas.

#### 2.1.1. *Onda Primária ou Onda P*

A onda primária leva esse nome por ser a mais rápida e chegar primeiro aos detectores sísmicos. Caracteriza-se por ser compressiva e longitudinal, ou seja, propaga-se comprimindo e dilatando o corpo em direção paralela ao seu deslocamento, semelhantemente às ondas sonoras; consegue propagar-se em meios sólidos ou líquidos (SUCUOGLU e AKKAR, 2014).

### 2.1.2. Onda Secundária ou Onda S

A onda secundária, além de mais lenta, caracteriza-se por ser cisalhante e transversal, ou seja, propaga-se deformando o meio na direção perpendicular ao seu deslocamento, semelhantemente às ondas numa corda, mas em três dimensões. Não consegue propagar-se em meios líquidos (SUCUOGLU e AKKAR, 2014)

### 2.1.3. Onda de Rayleigh

As ondas de superfície são o resultado do aprisionamento das ondas de corpo na interface entre o terreno e a atmosfera. A onda de Rayleigh é resultante da combinação entre as ondas P e SV (ondas S na direção Vertical) aprisionadas e por isso é polarizada no plano vertical. Caracteriza-se por um movimento elíptico retrógrado com uma velocidade de propagação de aproximadamente 90% da onda S. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014)

### 2.1.4. Onda de Love

A onda de Love é resultante do aprisionamento das ondas SH (ondas S na direção Horizontal). Caracteriza-se por um movimento polarizado no plano horizontal e possui uma velocidade entre a velocidade de propagação da onda S no plano horizontal e no terreno subjacente. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014).

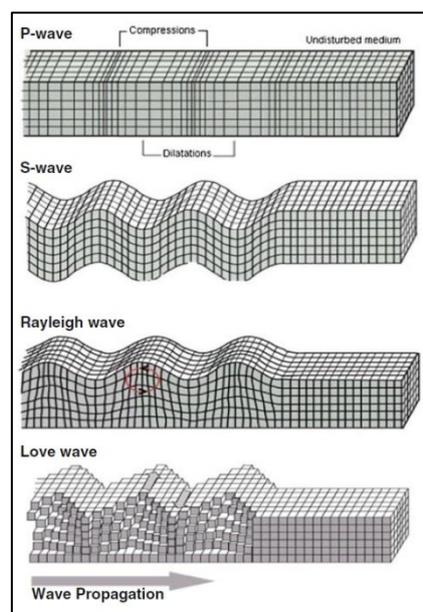


Figura 2-1 - Movimento das partículas no meio elástico devido a propagação das ondas P, S, de Rayleigh e de Love. Fonte: SUCUOGLU e AKKAR (2014).

## 2.2. Estrutura interna da Terra

A investigação do interior da Terra se baseou principalmente na análise das velocidades de propagação das ondas sísmicas, originárias de terremotos ao longo de todo o globo. Em geral, esta velocidade aumenta com a profundidade, ora varia gradualmente, ora muda bruscamente, indicando a existência de um limite entre camadas com características distintas. São essas diferenças que definem a classificação mais usual das camadas do planeta, Crosta, Manto e Núcleo (Figura 2-2). A Crosta pode ser dividida ainda em crosta continental e crosta oceânica, o Manto em manto superior, zona de transição e manto inferior; e o Núcleo em núcleo interno e núcleo externo. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014).

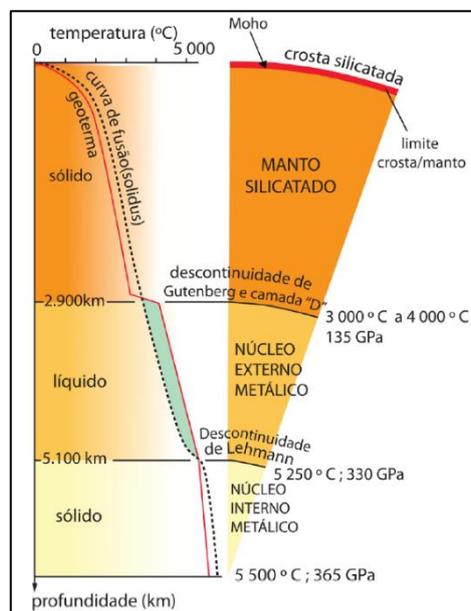


Figura 2-2 - Camadas internas da Terra com detalhes de temperatura e pressão por profundidade. Fonte: TOLEDO (2014)

### 2.2.1. Crosta Terrestre

A Crosta é a parte mais superficial da Terra. Em sua parte oceânica, sua espessura varia entre 5 a 10 km, e em sua parte continental de 35 a 70 km. Em geral, as porções mais espessas da crosta continental são zonas geologicamente ativas e de grandes altitudes (Andes, Alpes etc.), enquanto as menos espessas são zonas de maior estabilidade e pequenas altitudes (Planalto Central brasileiro, Serra do Mar, etc.). A crosta oceânica é mais jovem e é formada basicamente por rochas de origem vulcânica, mais densas que as continentais, além de sedimentos geologicamente jovens, originados pela erosão na

superfície dos continentes. A crosta continental é formada por rochas de diferentes origens (ígneas, metamórficas e sedimentares) menos densas e é recoberta por material não consolidado formado pela ação das intempéries nessas rochas. (GUPTA, 2011)

O limite inferior desta camada, que a separa do Manto, é conhecido como Descontinuidade de Mohorovicic ou abreviado como Moho, em homenagem a Andrija Mohorovicic que primeiro identificou sua existência em 1909.

### 2.2.2. *Manto*

O Manto é a segunda camada da Terra. Localiza-se a uma profundidade entre 30 e 2900 km, encontra-se em estado sólido, é formada basicamente por minerais silicáticos, Ferro e Magnésio e é subdividido em três outras camadas concêntricas, manto superior (30-400 km), zona de transição (400-650 km) e manto inferior (650-2900 km). Essas subdivisões tomam como base pequenas alterações na velocidade de propagação das ondas P. Conforme a profundidade aumenta, outros parâmetros importantes como temperatura, pressão, densidade, velocidade das ondas sísmicas e a concentração de metais como Ferro e Magnésio também aumentam. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014)

A variação de temperatura e pressão ao longo da extensão do manto gera diferentes condições do seu material componente, como por exemplo uma zona de baixa velocidade dentro do manto superior denominada Astenosfera, de suma importância para o entendimento da Teoria de Tectônicas de Placas, abordada à frente.

O limite inferior desta camada, que a separa do Núcleo, é conhecido como Descontinuidade de Gutenberg, em homenagem a Beno Gutenberg que em 1913 identificou sua existência ao estudar a zona de sombra das ondas sísmicas.

### 2.2.3. *Núcleo*

O Núcleo terrestre foi descoberto pelo geólogo britânico Richard Oldham em 1906, e posteriormente subdividido em núcleo externo (2900 a 5150 km) e interno (5150 a 6371 km, raio da Terra), o primeiro líquido e o segundo sólido.

No núcleo externo, não há a propagação de ondas S, o que indica seu estado líquido. Devido à condição de temperatura e pressão, os metais componentes deste núcleo, ferro e níquel, assim como outros elementos mais leves (O, Na, Mg e S), encontram-se em

estado líquido e, segundo a teoria mais aceita, se movem em movimentos convectivos helicoidais formando o campo magnético da Terra, através do efeito dínamo (GUPTA, 2011).

A existência do núcleo interno foi primeiro postulada por Inge Lehmann, geóloga dinamarquesa, em 1936, para explicar o registro de ondas P entre as distâncias angulares de 105° e 142°, zona de sombra das ondas P. Ele é composto principalmente por ferro e níquel e, apesar de estar submetido a altas temperaturas, a alta pressão faz com que permaneça em estado sólido. Encontra-se entre as profundidades de 5150 a 6371 km. O limite superior desta camada é chamado de Descontinuidade de Lehmann em homenagem à sua descobridora.

### **2.3. Teoria da Tectônica de Placas**

Além da divisão clássica em camadas baseada na geoquímica da Terra, há uma outra divisão baseada na geodinâmica da Terra (Figura 2-3). Nesse contexto a Crosta e a parte superior do Manto formam juntas a Litosfera, com uma espessura de aproximadamente 150 km no trecho oceânico e até 400 km no trecho continental. Essa parte rígida fica localizada acima de uma camada estreita, um pouco mais plástica, mas ainda sólida, a Astenosfera. Abaixo desta encontra-se o restante do Manto classificado como Mesosfera e a seguir a parte central que segue a classificação geoquímica, de núcleo externo e interno.

A Teoria da Tectônica de Placas, consolidada nos anos 60 com as contribuições de Harry Hess (1962), Jason Morgan (1967), Dan McKenzie (1968) e Xavier Le Pichon (1968), define que porções da Litosfera, chamadas de placas tectônicas, se deslocam lentamente sobre a astenosfera, impulsionadas pelas correntes de convecção subjacentes do Manto. Parte desta teoria já havia sido proposta por Alfred Wegener em 1912, que identificou semelhanças em fósseis de animais e plantas, assim como de estruturas geológicas do oeste africano e do leste brasileiro, e conjecturou que os dois continentes haviam sido um único em um passado longínquo. Esta teoria ficou conhecida como Deriva Continental, mas as evidências à época foram consideradas poucas e suas ideias foram preteridas pela academia, uma vez que não conseguiu se explicar o mecanismo físico por trás do processo de separação. (adaptado de BEM-MENACHEM, 1995)

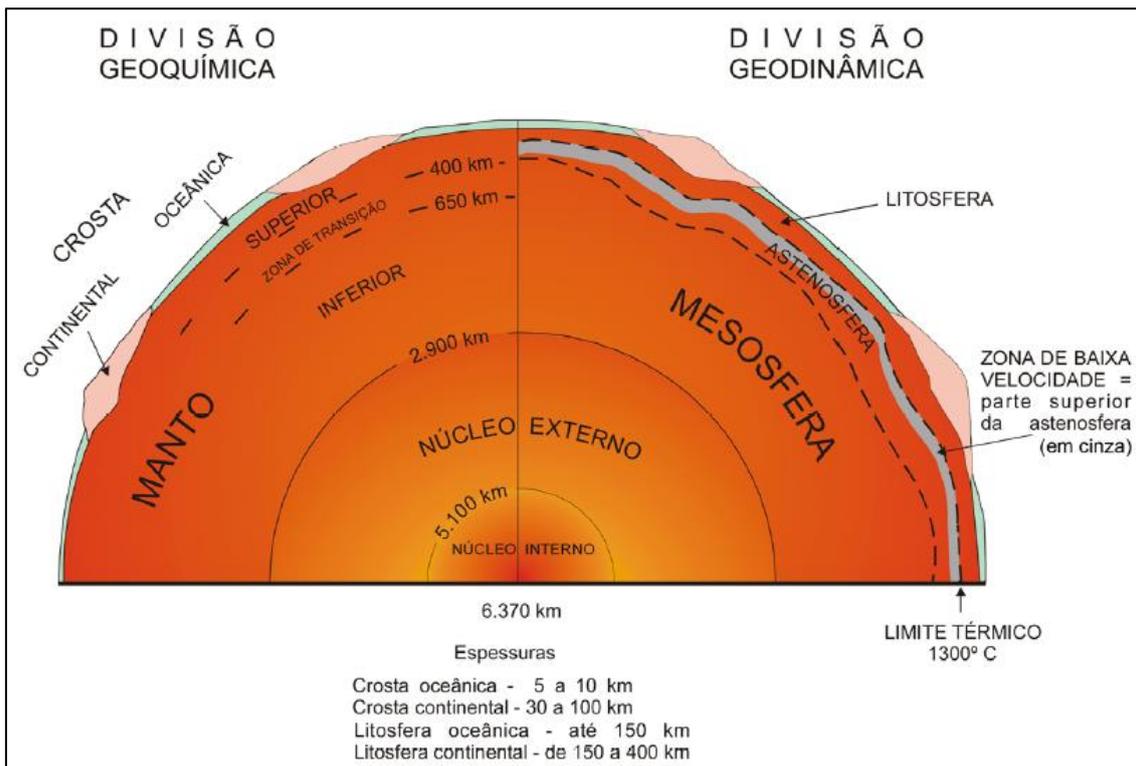


Figura 2-3 - Estrutura interna da Terra, divisão geoquímica e divisão geodinâmica.

Fonte: TOLEDO (2014)

Há basicamente três tipos de movimentos relativos possíveis entre placas tectônicas: divergente, convergente e transcorrente. No movimento divergente as duas placas se afastam uma da outra e ocorre a formação de um novo trecho da Crosta. Esse fenômeno pode ser observado na Cadeia Dorsal Mesoatlântica onde o magma sobe de dentro do Manto, empurra as placas (Placa Sul-Americana e Placa Africana) lateralmente em sentidos opostos e ao emergir é resfriado crescendo material novo no meio da cadeia de montanhas. Este processo de criação contínua da crosta é acompanhado de um processo contínuo de destruição em outra parte do planeta, chamado de subducção.

A subducção ocorre em um movimento convergente entre placas, quando uma delas é empurrada para baixo da outra em direção ao Manto. Esse fenômeno pode ser observado na Cordilheira dos Andes, onde a Placa de Nazca está sendo empurrada para baixo da Placa Sul-Americana e sendo consumida pelo Manto. Os dois processos citados podem ser visualizados na Figura 2-4. Há ainda o movimento transcorrente em que duas placas se deslocam paralelamente e não há formação nem destruição da crosta. Esse tipo de movimento forma falhas bem definidas como a de San Andreas na Califórnia entre a Placa Norte-Americana e a Placa do Pacífico. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014)

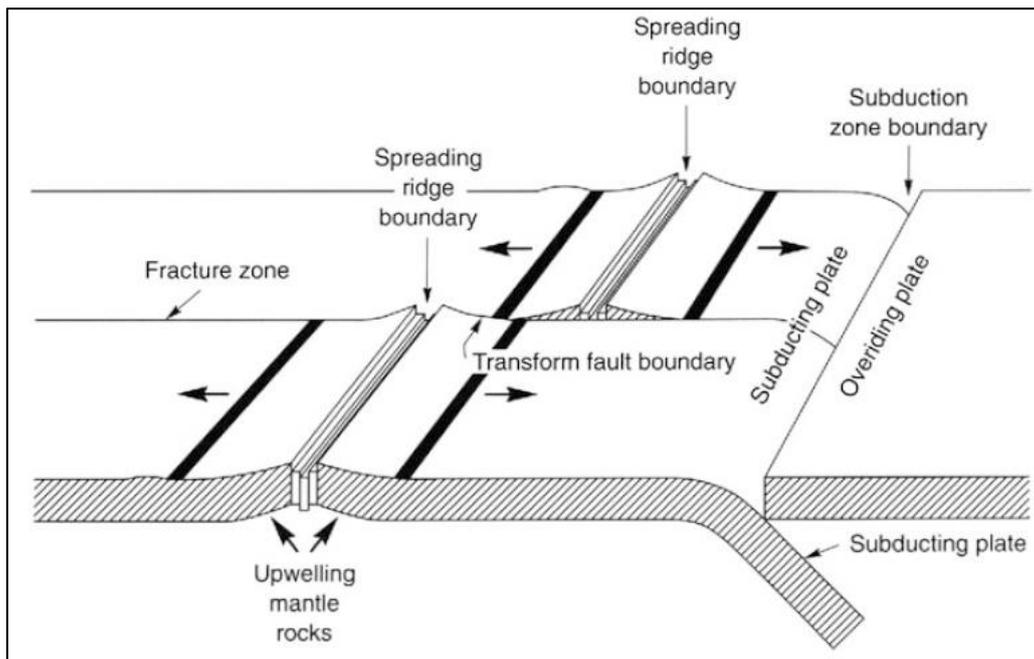


Figura 2-4 - Movimentos relativos convergente e divergente entre placas tectônicas.

Fonte: SUCUOGLU e AKKAR (2014).

#### 2.4. Origem dos sismos

Sismos são movimentos vibratórios do solo que podem ser produzidos naturalmente (movimentação de placas tectônicas, erupções vulcânicas, queda de asteroides) ou artificialmente (explosões de bombas atômicas, colapso de poços de petróleo, colapso de minas subterrâneas). Todavia, o interesse maior da sismologia é investigar a ocorrência dos sismos de origem tectônica, pois estes são um dos maiores responsáveis pela perda de vidas humanas ao longo da história.

A teoria mais aceita para explicar a origem dos sismos de origem tectônica é a Teoria do Rebote Elástico (tradução livre para *Elastic-Rebound Theory*) publicada por Harry F. Reid em 1911, após o terremoto de São Francisco de 1906, quando coletou dados para seu trabalho de pesquisa (Figura 2-5). Em resumo, esta teoria explica que o movimento relativo entre duas placas é impedido pelo atrito entre elas, o qual gera, lentamente ao longo de dezenas ou centenas de anos, um acúmulo de tensões em ambos os lados da falha. Quando o limite de atrito é atingido, há um deslizamento súbito de uma placa sobre a outra e a energia acumulada é então liberada bruscamente sob a forma de vibrações sísmicas, os terremotos. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014)

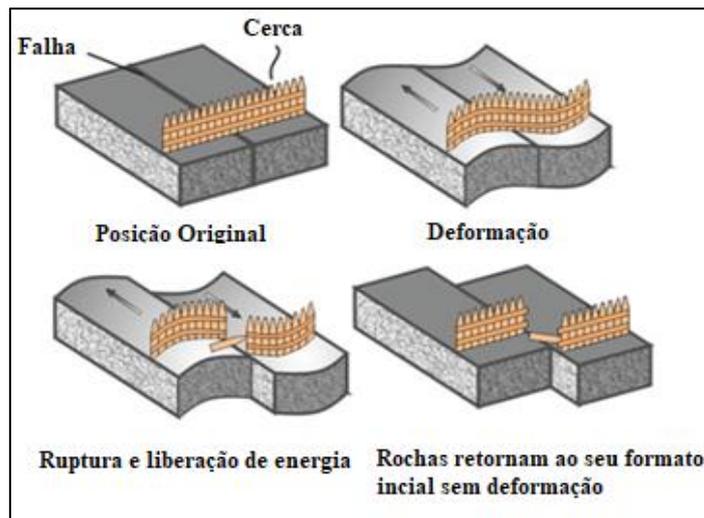


Figura 2-5 - Mecanismo de funcionamento da Rebote Elástico.

Fonte: Adaptado de SUCUOGLU e AKKAR (2014).

A grande maioria dos terremotos do mundo é gerada nas regiões de borda das placas tectônicas, chamadas regiões interplacas, e ocorrem como resultado de movimentos relativos entre elas de todos os tipos (divergente, convergente e transcorrente). As regiões no interior das placas tectônicas, afastadas das suas bordas, são chamadas de regiões intraplacas e também apresentam atividade sísmica, mas de menor intensidade. Seus movimentos não estão diretamente ligados ao encontro de placas tectônicas. Apesar de ser um assunto ainda em discussão, este tipo de terremoto é usualmente explicado por dois tipos de modelos: zonas de fragilidade da crosta e zonas de concentração de tensões (ASSUMPCÃO *et al.*, 2014).

No Brasil, a concentração de tensões na parte superior da crosta pode ser explicada por afinamentos da litosfera e por efeitos de flexão devidos a cargas de sedimentos ou a cargas internas da litosfera. As zonas de fragilidade, por sua vez, são mais difíceis de mapear, mas são geralmente associadas a regiões com falhas geológicas ativas. (ASSUMPCÃO *et al.*, 2016)

Apesar de haver uma diferença na origem das tensões das falhas, como explicado acima, o mecanismo proposto por Reid, funciona da mesma forma nas regiões interplacas e intraplacas. Segundo SUCUOGLU e AKKAR (2014), a falha geológica é uma ruptura da rocha ou bloco rochoso ao longo de sua estrutura e pode ser idealizada como um plano de ruptura retangular entre dois blocos de rocha. As falhas podem ser classificadas segundo a forma de ruptura como normal, inversa ou transcorrente (Figura 2-6).

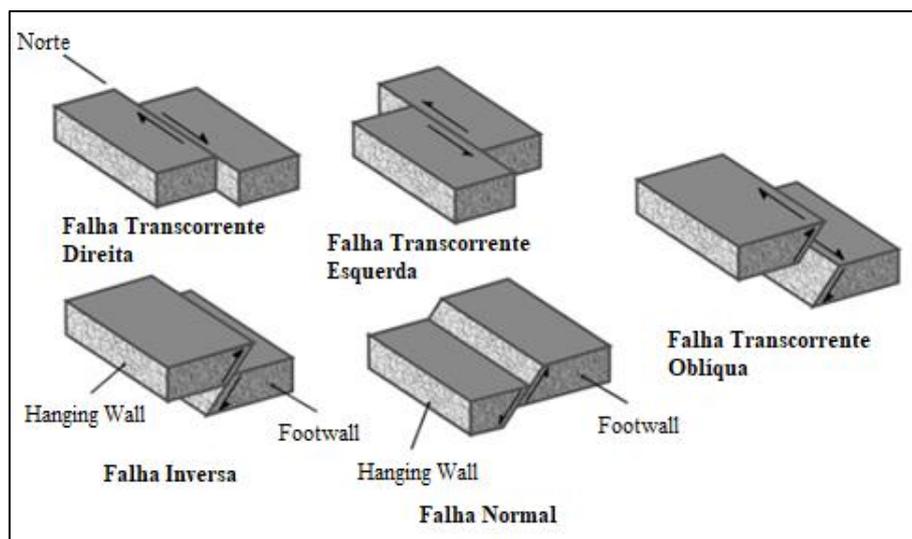


Figura 2-6 - Tipos de falhas geológicas. Fonte: Adaptado de SUCUOGLU e AKKAR (2014)

#### 2.4.1. Falha Normal

Na falha normal ou direta, a porção superior ao plano de falha, chamada teto ou capa (*hanging wall*), se movimenta para baixo em relação à porção inferior ao plano de falha, chamada muro ou lapa (*footwall*). Esse tipo de falha indica uma região de tração entre os blocos.

#### 2.4.2. Falha Inversa

Na falha inversa o teto ou capa se movimenta para cima em relação ao muro ou lapa. Esse tipo de falha indica uma região de compressão entre os blocos.

#### 2.4.3. Falha Transcorrente

Na falha transcorrente um bloco se movimenta horizontalmente em relação ao outro e pode estar associada a outras formas de movimentos verticais (como falha oblíqua).

### 2.5. Escalas de Sismos

A quantificação de um sismo pode ser feita em termos de sua intensidade ou de sua magnitude. A magnitude é uma medida instrumental, quantitativa e está associada à energia liberada pelo sismo. Já a intensidade é uma medida não instrumental, qualitativa

e está associada ao impacto causado pelo sismo na população, terrenos e estruturas. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014)

### 2.5.1. *Escalas de Intensidade*

As escalas de intensidade são usadas para se obter um registro do efeito de um sismo em determinada localidade e tem um caráter subjetivo de avaliação. Elas associam a descrição do dano causado pelo sismo a uma graduação numérica pré-definida. Esse tipo de escala é muito útil para se estimar magnitudes de terremotos antigos, assim como para uma avaliação global da vulnerabilidade de estruturas e localidades a abalos sísmicos. Contudo, terremotos de pequeno porte ou em lugares ermos dificilmente conseguem ser avaliados por esse tipo de escala.

Dentre as escalas de intensidade mais importantes estão:

- a) Mercalli-Cancani-Seiberg (MCS) com 12 níveis, usada no sul da Europa;
- b) Mercalli Modificada (MM) com 12 níveis, é uma adaptação da escala MCS. Usada na América do Norte e em vários outros países;
- c) Medvedev-Sponheuer-Karnic (MSK) com 12 níveis, usada na Europa Central;
- d) Japanese Meteorological Agency (JMA) com 7 níveis, usada no Japão.

### 2.5.2. *Escalas de Magnitude*

As escalas de magnitude são as mais utilizadas para quantificar terremotos no mundo todo. Elas relacionam a energia liberada por um abalo sísmico a uma graduação numérica. Existem vários tipos de escala de magnitude e suas diferentes características ajudam numa análise mais completa sobre os abalos sísmicos. A consideração de escalas diferentes é um ponto de atenção importante no tratamento de dados utilizados na análise de ameaça sísmica e pode-se incorrer em erros importantes se não for feita corretamente.

Dentre as escalas de magnitude mais importantes estão:

- a) Escala de Magnitude Local (Escala de Richter,  $M_L$ ):  
Criada por Charles F. Richter em 1935, possibilitou a medição da intensidade terremotos de diferentes intensidades numa mesma escala e, ao contrário do senso comum, não possui limite inferior nem superior. Esta escala é calculada pelo logaritmo decimal da amplitude máxima do registro sísmico.

- b) Escala de Magnitude de Onda de Corpo ( $m_b$ ) e de Ondas de Superfície ( $M_s$ ):  
As escalas de magnitude  $m_b$  e  $M_s$  são dois tipos de escalas de magnitude telessísmica, alternativas à escala  $M_L$ , que descrevem a dimensão do terremoto a partir das amplitudes máximas das formas de onda sísmicas normalizadas pelo período natural  $T$  do sismógrafo. O uso de amplitudes normalizadas torna os cálculos de magnitude independentes do tipo de sismógrafo. Eles são estimados a partir das formas de onda sísmicas registradas pelos sismogramas de curto período ( $m_b$ ) e de longo período ( $M_s$ ).
- c) Escala de Magnitude de Momento ( $M_w$ ):  
Criada por Thomas C. Hanks e Hiroo Kanamori em 1979, esta escala superou as limitações das escalas anteriores. Terremotos com amplitudes muito grandes não conseguem ser detectados adequadamente pelos sismógrafos usados pelas escalas  $M_L$ ,  $m_b$  e  $M_s$ . Portanto, nenhuma dessas escalas é capaz de quantificar a dimensão real dos terremotos quando eles crescem, ou seja, os sismógrafos subestimam os valores do sismo, pois seu aumento de dimensão não produz um aumento consistente em  $M_L$ ,  $m_b$  e  $M_s$ . Esse fenômeno é chamado de saturação de magnitude.  
Como esta escala é diretamente atrelada ao momento sísmico, que por sua vez é diretamente proporcional à área de ruptura da falha e à dimensão do deslocamento relativo entre blocos, o problema de saturação é resolvido e ela pode ser usada para medir sismos de diferentes magnitudes sem distorções.
- d) Escala de Magnitude Regional ( $M_R$ ):  
A Escala de Magnitude Regional foi concebida por ASSUMPCÃO (1983) e consiste na adaptação da escala telessísmica  $m_b$  para as distâncias regionais do território brasileiro. Esta escala fornece números mais precisos do que a escala  $m_b$  para terremotos pequenos e médios ( $2 < m_b < 5$ ) e é largamente usada no Catálogo Sísmico Brasileiro.

### 3. ANÁLISE DA AMEAÇA SÍSMICA

---

A análise da ameaça sísmica (*Seismic Hazard Analysis – SHA*) pode ser definida como o processo de avaliação de um dado parâmetro de movimentação do solo (aceleração de pico do solo – *Peak Ground Acceleration - PGA*, velocidade de pico do solo – *Peak Ground Velocity - PGV*, aceleração espectral – *Spectral Acceleration – Sa*, etc) em eventos sísmicos pretéritos para obter uma estimativa do nível do mesmo em eventos sísmicos futuros (SUCUOGLU e AKKAR, 2014).

Apesar da semelhança entre os termos ameaça e risco, há uma diferença importante entre eles. Quando a análise se refere à ameaça, ela se atém à investigação da ocorrência de terremotos, e quando se refere ao risco, além dos terremotos, são analisadas as consequências e a possibilidade de danos a um determinado local. Ou seja, a combinação entre análise de ameaça sísmica e avaliação de vulnerabilidade sísmica do local consiste na análise de risco sísmico.

Existem duas abordagens mais comuns para a análise de ameaça sísmica, a probabilística e a determinística. Ambas têm como dado de saída o valor estimado do parâmetro de movimento do solo escolhido (PGA, PGV, Sa, etc), mas enquanto a determinística adota um único terremoto e não considera incertezas, a probabilística considera todos os terremotos possíveis com suas respectivas chances de acontecer e considera incertezas em várias etapas do cálculo. (BUDNITZ *et al.*, 1997)

#### 3.1. Análise Probabilística da Ameaça Sísmica

Segundo ALMEIDA (2002), a análise probabilística da ameaça sísmica (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis - PSHA*) pode ser definida como uma “sistemática analítica que, para um determinado sítio e um dado período de tempo, estima a probabilidade de serem excedidos os níveis de vibração do terreno causados por fenômenos sísmicos”.

Esse tipo de análise foi primeiro elaborado por CORNELL (1968) e ao longo das décadas foi sendo modificado e aperfeiçoado por vários autores. Neste trabalho será apresentada a metodologia proposta por BAKER (2013), com uma abordagem mais didática sobre o assunto, junto a informações complementares de ALMEIDA (2002), BUDNITZ *et al.* (1997) e SUCUOGLU e AKKAR (2014).

A metodologia do PSHA pode ser dividida em 5 etapas:

- 1) Identificação das fontes sísmicas;
- 2) Caracterização da distribuição das magnitudes;
- 3) Caracterização da distribuição das distâncias entre fontes sísmicas e o local de interesse;
- 4) Escolha do modelo de previsão de movimentos do solo (*Ground Motion Prediction Model – GMPM*), anteriormente chamado de função de atenuação;
- 5) Cálculo da curva de ameaça sísmica combinando as incertezas da magnitude, da localização e da intensidade do movimento do solo através do Teorema da Probabilidade Total.

### 3.1.1. Identificação das fontes sísmicas

O primeiro passo da análise probabilística é a identificação das fontes sísmicas através de estudos geológicos e sismotectônicos das possíveis estruturas sismogênicas do local de interesse. Em seguida, consulta-se o catálogo de sismos, que contém o levantamento histórico das magnitudes e localizações dos sismos que no passado afetaram a região, a fim de associar os terremotos às essas estruturas levantadas. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014). No Brasil, tais informações podem ser encontradas no Catálogo Sísmico Brasileiro no sítio eletrônico da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR, 2020).

Uma das principais hipóteses adotadas nesta etapa é que essas fontes sísmicas são independentes, isto é, um evento sísmico que ocorre em uma delas não interfere em outro evento da outra fonte. Isto pode não ser necessariamente verdade, pois a liberação de energia em um terremoto pode desencadear sismos em outras regiões, porém é uma simplificação razoável adotada na PSHA para se obter expressões estatísticas que tornem possível o cálculo e análise por esse método. Neste sentido, existem alguns tratamentos dos dados do catálogo de sismos que devem ocorrer antes de serem considerados nos modelos.

Como pode ser observado no Catálogo Brasileiro de Sismos, alguns terremotos são precedidos e sucedidos por outros numa mesma localidade em um curto espaço de tempo. Estes terremotos são chamados de “*foreshocks*” e “*aftershocks*” e formam um aglomerado temporal de eventos interdependentes e que devem passar por um processo

de “*declustering*” a fim de atenderem à hipótese de independência temporal exigida pelo PSHA (GUPTA, 2011).

Outro tratamento importante dos dados é a uniformização da escala de magnitude. Como também pode ser observado no Catálogo Brasileiro de Sismos, muitas vezes são usadas diferentes escalas de magnitude para se medir terremotos em uma mesma localidade. Nesse sentido, é necessário usar funções adaptadas à realidade sísmica local, ou minimamente compatíveis, para transformar as diferentes escalas em uma única.

Após a investigação inicial sobre as fontes sísmicas e o ambiente sismotectônico no qual estão inseridas, segundo ALMEIDA (2002), as fontes podem ser classificadas em 4 tipos representados na Figura 3-1:

Tipo 1: Falhas representadas por linhas ou planos.

Tipo 2: Área-fonte que engloba uma zona de sismicidade concentrada.

Tipo 3: Área-fonte regional, definida por características sismotectônicas regionais, conhecidas como províncias sismotectônicas.

Tipo 4: Área-fonte de sismicidade difusa, i.e., uma fonte que não tem correlações sismotectônicas regionais.

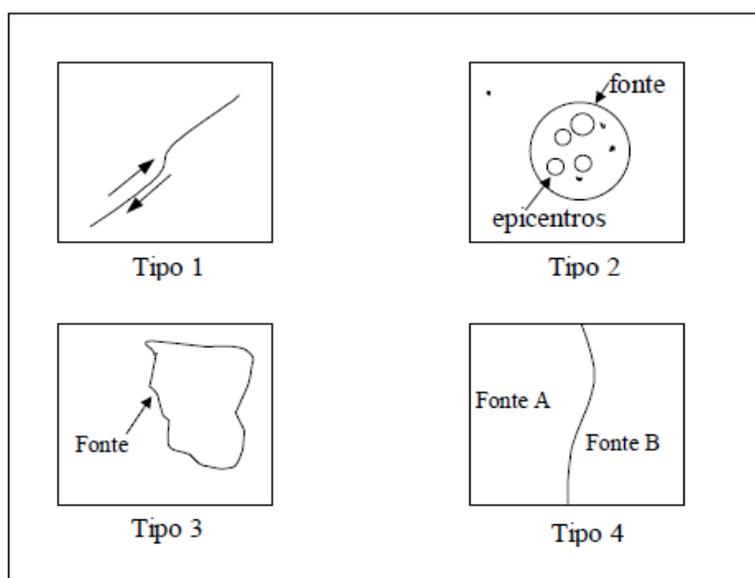


Figura 3-1 - Tipos de fontes sísmicas. Fonte: ALMEIDA (2002)

Em regiões de baixa sismicidade, como o Brasil, a identificação das falhas é uma tarefa difícil, por isso é usualmente escolhida uma representação da fonte sísmica do tipo

área-fonte de sismicidade difusa (Tipo 4), no caso de não existirem correlações sismotectônicas regionais (ALMEIDA, 2002).

A geometria e a localização da fonte sísmica devem ser estabelecidas como uma região da crosta terrestre que possui determinadas características similares de sismicidade, tais como magnitude máxima e taxas de recorrência relativamente uniformes e distintas daquelas das fontes vizinhas.

### 3.1.2. Caracterização da distribuição das magnitudes

Nesta etapa deve-se adotar, para as fontes sísmicas, um modelo matemático que descreva a relação entre quantidade anual de sismos e a magnitude, a partir do qual se extraia a probabilidade de ocorrência de um sismo com magnitude maior ou igual a uma desejada.

O primeiro modelo deste tipo foi descrito por Gutenberg e Richter em 1944 através da chamada Lei de Recorrência de Gutenberg-Richter (“*Gutenberg-Richter recurrence law*”), dada pela Equação 3-1:

$$\log \lambda_m = a - bm \quad (3-1)$$

Ou ainda, sob a forma de logaritmo natural:

$$\ln \lambda_m = \alpha - \beta m \therefore \lambda_m = e^{\alpha - \beta m} \quad (3-2)$$

$$\alpha = a \ln 10$$

$$\beta = b \ln 10$$

Onde:

$\lambda_m$  taxa anual de sismos com magnitude igual ou maior que  $\underline{m}$ , isto é, razão entre a soma de sismos igual ou maior que  $\underline{m}$  e o período de tempo em anos entre a primeira e última medida desses sismos.

$a$  e  $b$  constantes relacionadas à sismicidade da falha ou da área-fonte de interesse.

A taxa anual de sismos deve ser calculada levando em consideração o processo de completude (“*completeness*”). Devido ao fato dos sismos de baixa intensidade só

começaram a ser medidos de forma mais precisa a partir da implantação de sismógrafos, e eventualmente algum sismógrafo poder apresentar mau funcionamento, os catálogos tendem a ficar incompletos. Para evitar o erro de cálculo da taxa anual de ocorrência de sismos decorrente deste problema, esse processo atribui a cada faixa de magnitude um período de completude diferente, o que gera valores mais coerentes com a realidade.

O parâmetro  $\underline{a}$  está ligado ao nível de atividade sísmica da fonte estudada, isto é, quanto maior o valor de  $\underline{a}$ , maior a atividade sísmica esperada para ela. O parâmetro  $\underline{b}$  descreve a razão entre eventos de pequena e grande magnitudes, isto é, um valor alto deste parâmetro indica uma predominância de sismos de pequena magnitude em relação aos de grande magnitude, ao passo que um baixo valor de  $\underline{b}$  indica uma contribuição maior dos sismos de grande magnitude para a sismicidade da fonte (SUCUOGLU e AKKAR, 2014).

A partir da lei de recorrência de Gutenberg-Richter, segundo BAKER (2013), podemos deduzir a função de distribuição cumulativa,  $F_M$  (*cumulative distribution function – CDF*) deste modelo, conforme a Equação 3-3:

$$F_M(m) = P(M \leq m | M > m_{min}) = \frac{\text{taxa anual de sismos com } m_{min} < M \leq m}{\text{taxa anual de sismos com } m_{min} < M} =$$

$$= \frac{\lambda_{m_{min}} - \lambda_m}{\lambda_{m_{min}}} = \frac{e^{\alpha - \beta m_{min}} - e^{\alpha - \beta m}}{e^{\alpha - \beta m_{min}}} = 1 - e^{-\beta(m - m_{min})}, \quad m > m_{min} \quad (3-3)$$

Podemos ainda calcular a função de densidade de probabilidade,  $f_M$  (*probability density function – PDF*), como a derivada de  $F_M$  calculada na Equação 3-4.

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m) = \frac{d}{dm} [1 - e^{-\beta(m - m_{min})}] = \beta e^{-\beta(m - m_{min})}, \quad m > m_{min} \quad (3-4)$$

A função de distribuição cumulativa, como explicitado na Equação 3-4, fornece a probabilidade de uma magnitude qualquer  $\underline{M}$  ser menor ou igual a uma magnitude fornecida  $\underline{m}$ .

A magnitude mínima ( $m_{min}$ ) é estabelecida pelo profissional analista como a magnitude a partir da qual há interesse técnico em se investigar os sismos. Em regiões interplacas de sismicidade elevada, por exemplo, costuma-se adotar a magnitude 5.0 Mw, pois considera-se que é a magnitude a partir da qual as estruturas sofrem danos relevantes.

Apesar de existirem vários outros modelos de recorrência mais complexos, o modelo de Gutenberg-Richter ainda é muito útil, mas numa versão atualizada. Atualmente, principalmente em regiões intraplacas, utiliza-se uma variação proposta por MCGUIRE e ARABASZ (1990), conhecida como modelo de Gutenberg-Richter truncado (*truncated Gutenberg-Richter earthquake recurrence model*), o qual limita o intervalo de validade da função de distribuição a um valor máximo de magnitude ( $m_{max}$ ). Esta alteração, além de adequar melhor a função aproximada aos dados, considera o conceito de que há um limite físico para as magnitudes geradas pela fonte sísmica. (SUCUOGLU e AKKAR, 2014)

Segundo ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019), a lei de recorrência truncada em  $m_{max}$  tem a forma mostrada na Equação 3-5:

$$\lambda_m = \lambda_{m_{min}} \left( \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta m_{max}}}{e^{-\beta m_{min}} - e^{-\beta m_{max}}} \right) \quad (3-5)$$

Onde:  $\lambda_{m_{min}} = e^{\alpha - \beta m_{min}}$

A CDF e a PDF do modelo truncado podem, então, ser deduzidas de maneira semelhante à apresentada nas Equações 3-3 e 3-4.

$$\begin{aligned} F_M(m) &= P(M \leq m | m_{min} < M < m_{max}) = \\ &= \frac{\text{taxa anual de sismos com } m_{min} < M \leq m}{\text{taxa anual de sismos com } m_{min} < M < m_{max}} = \frac{\lambda_{m_{min}} - \lambda_m}{\lambda_{m_{min}} - \lambda_{m_{max}}} = \\ &= \frac{\lambda_{m_{min}} - \lambda_{m_{min}} \left( \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta m_{max}}}{e^{-\beta m_{min}} - e^{-\beta m_{max}}} \right)}{\lambda_{m_{min}} - 0} = 1 - \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta m_{max}}}{e^{-\beta m_{min}} - e^{-\beta m_{max}}} = \\ &= \frac{e^{-\beta m_{min}} - e^{-\beta m_{max}} - e^{-\beta m} + e^{-\beta m_{max}}}{e^{-\beta m_{min}} - e^{-\beta m_{max}}} = \frac{e^{-\beta m_{min}} - e^{-\beta m}}{e^{-\beta m_{min}} - e^{-\beta m_{max}}} = \\ &= \frac{1 - e^{-\beta(m-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}}, \quad m_{min} < m < m_{max} \end{aligned} \quad (3-6)$$

Da mesma forma, segue:

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m) = \frac{d}{dm} \left[ \frac{1 - e^{-\beta(m-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}} \right] = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_{min})}}{1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}}, \quad (3-7)$$

$$m_{min} < m < m_{max}$$

A magnitude máxima ( $m_{max}$ ) de um sismo que uma fonte sísmica é capaz de gerar pode ser determinada a partir das informações dos catálogos de sismos ou a partir de expressões empíricas que estimam  $m_{max}$  usando as dimensões de ruptura da falha. A primeira abordagem é geralmente usada para áreas-fontes, mas também pode ser usada no caso de falhas. Se  $m_{max}$  for calculada desta forma, o profissional analista pode considerar a maior magnitude observada no catálogo somada a um incremento de meia unidade de magnitude, a fim de contabilizar a incerteza sobre o maior futuro terremoto possível.

### 3.1.3. Caracterização da distribuição das distâncias

A distribuição probabilística das distâncias entre a fonte sísmica e o local de interesse também deve ser considerada no cálculo da probabilidade total. Em geral, adota-se a hipótese de sismicidade homogênea, isto é, que em qualquer ponto na fonte sísmica (linear ou área) haveria a mesma chance de ocorrência de um terremoto. Depois da divisão da fonte em uma malha suficientemente densa (linear ou em área), estabelece-se então a distribuição de probabilidades em função da distância,  $f_R(r)$  (Figura 3-2).

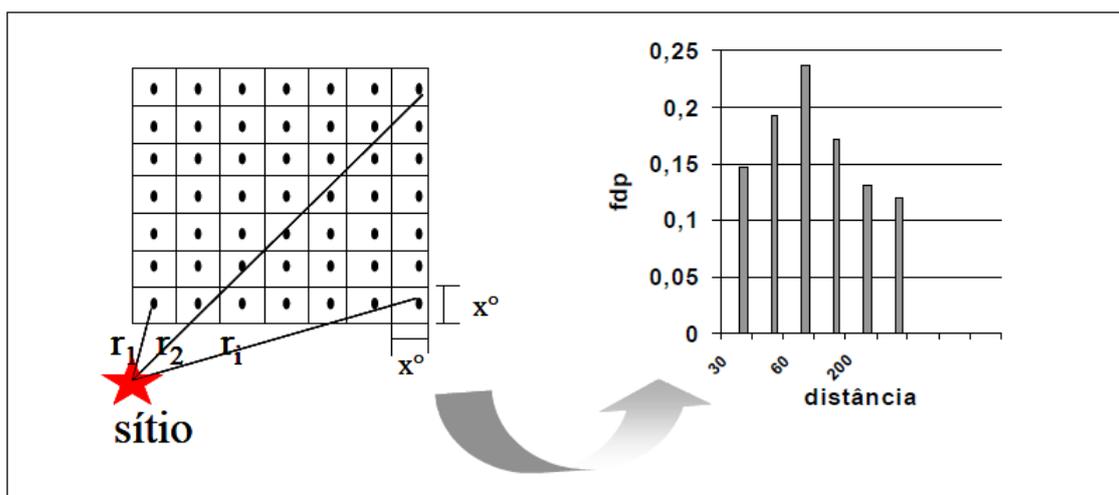


Figura 3-2 - Divisão da fonte em uma malha e distribuição de probabilidades em função da distância entre ponto de interesse e a fonte. Fonte: ALMEIDA (2002)

Vale ressaltar que dentro do campo da sismologia há vários tipos de distâncias definidas entre a fonte e o local de interesse, as quais variam de acordo com o ponto relacionado à origem do sismo (Figura 3-3). Dentre as mais importantes, destacam-se:

- a) Distância epicentral ( $R_{EPI}$ ), distância até o epicentro;
- b) Distância focal ( $R_F$ ), distância até o foco ou hipocentro;
- c) Distância de Joyner-Boore ( $R_{JB}$ ), a menor distância até a projeção vertical do plano de ruptura na superfície terrestre;
- d) Distância da Ruptura ( $R_{RUP}$ ), a menor distância até ao plano de ruptura.

A escolha de uma dessas distâncias deve ser compatível com o tipo de dado de entrada exigido pelo modelo de previsão de movimentos de solo (GMPM) a ser escolhido.

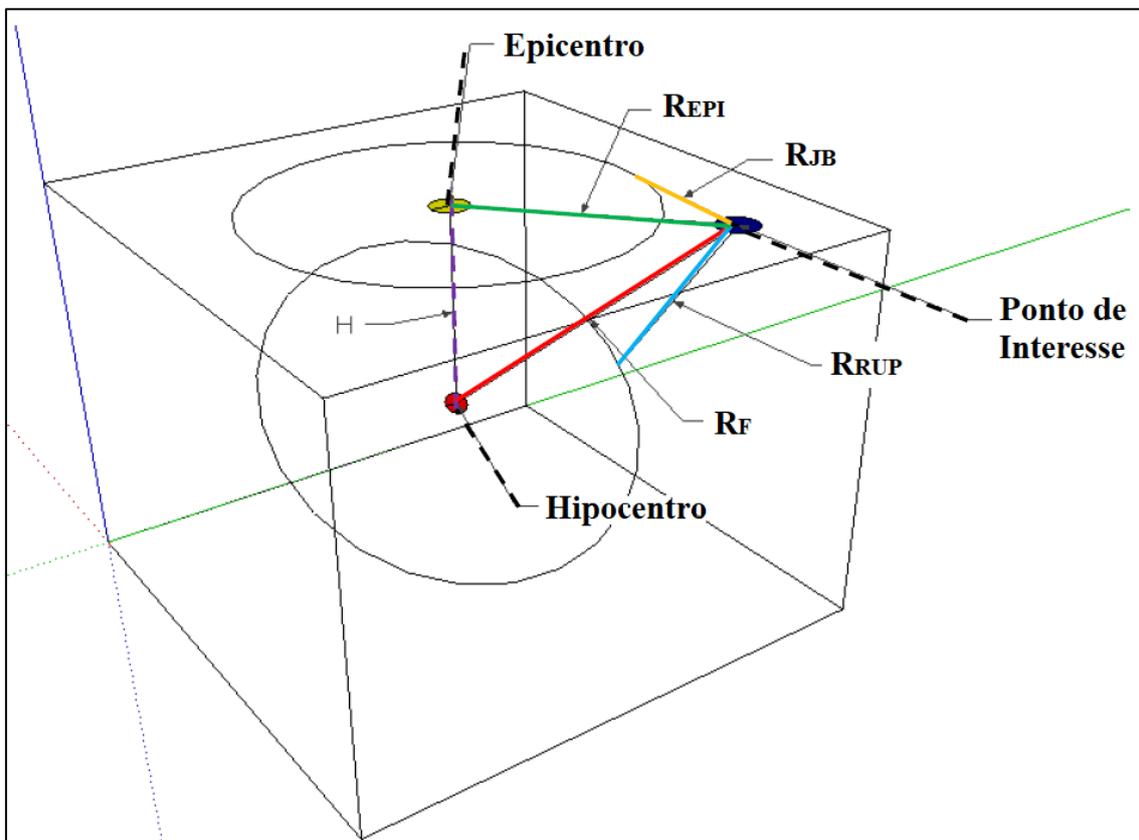


Figura 3-3 - Representação gráfica das diferentes distâncias.

Fonte: Adaptado de ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019)

#### 3.1.4. Escolha do modelo de previsão de movimentos do solo

Os modelos de previsão de movimentos do solo (GMPM) fornecem uma estimativa de um parâmetro de deslocamento do solo escolhido (PGA, PGV, Sa, etc.), junto à sua

distribuição de probabilidades, em função de variáveis como magnitude, distância, mecanismo de falha, condições locais próximas à superfície, efeitos de diretividade, etc. Os GMPM são obtidos numericamente através de regressão estatística aplicada aos dados registrados de vibrações sísmicas ou de dados gerados por simulações matemáticas de terremotos.

Mesmo após considerar as variáveis conhecidas citadas anteriormente, esses modelos apresentam uma dispersão significativa de resultados. Para lidar com essa dispersão, a maioria dos modelos adota a forma de uma função de distribuição log-normal que considera a dispersão, mostrada na Equação 3-8:

$$\ln Y = \overline{\ln Y}(m, r, \theta) + \varepsilon \cdot \sigma_{\ln Y}(m, r, \theta) \quad (3-8)$$

$\ln Y$  variável aleatória com distribuição normal, logaritmo natural do parâmetro  $Y$  escolhido de movimento do solo.

$\overline{\ln Y}$  média da amostra de  $\ln Y$ , função da magnitude, distância e outros parâmetros.

$\sigma_{\ln Y}$  desvio padrão da amostra de  $\ln Y$ , função da magnitude, distância e outros parâmetros.

$\varepsilon$  variável aleatória normal padrão que representa a variabilidade observada na amostra de  $\ln Y$ .

$m$  e  $r$  magnitude e distância dos sismos.

$\theta$  atribuição genérica para outros parâmetros além de magnitude e distância.

Em regiões onde os dados são precários, os parâmetros podem ser estimados por métodos que combinam aspectos teóricos e empíricos, ou então, adota-se um GMPM de outra região com características geológicas e sismotectônicas similares.

Para este tipo de distribuição, pode-se calcular a probabilidade de  $Y$  exceder um valor  $y$ , dados os valores de  $m$ ,  $r$  e  $\theta$  da amostra, através da Equação 3-9:

$$\begin{aligned}
 P(Y > y | m, r, \theta) &= P(\ln Y > \ln y | m, r, \theta) = \\
 &= \int_y^\infty \frac{1}{\sigma_{\ln Y} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln y - \overline{\ln Y}}{\sigma_{\ln Y}} \right)^2} dy, \quad y \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{3-9}$$

A integral acima é a que define a distribuição normal padrão do parâmetro  $\ln Y$  com média  $\overline{\ln Y}$  e desvio padrão  $\sigma_{\ln Y}$  e os seus limites definem a probabilidade desejada.

A Figura 3-4 mostra uma interpretação gráfica deste cálculo. Uma vez adotada a aceleração espectral (“*Spectral Acceleration*” -  $S_a$ ) para  $T=0,2s$  como parâmetro a ser estudado ( $Y=S_a$ ) e fixado o valor da magnitude ( $M=7$ ), obtém-se um gráfico de  $\ln(S_a)$  dependente somente da distância. A linha contínua preta representa os valores da média de  $\ln(S_a)$  para cada distância e a linha contínua vermelha representa o valor constante de  $\ln(0,75 g)$ . Então, para as distâncias escolhidas de 5, 20, 30, 50 e 75 km, consegue-se desenhar o gráfico da distribuição de probabilidades, e também calcular a probabilidade de exceder o valor  $S_a=0,75 g$ , como a área hachurada indicada,  $P(S_a > 0,75 g | m, r)$ .

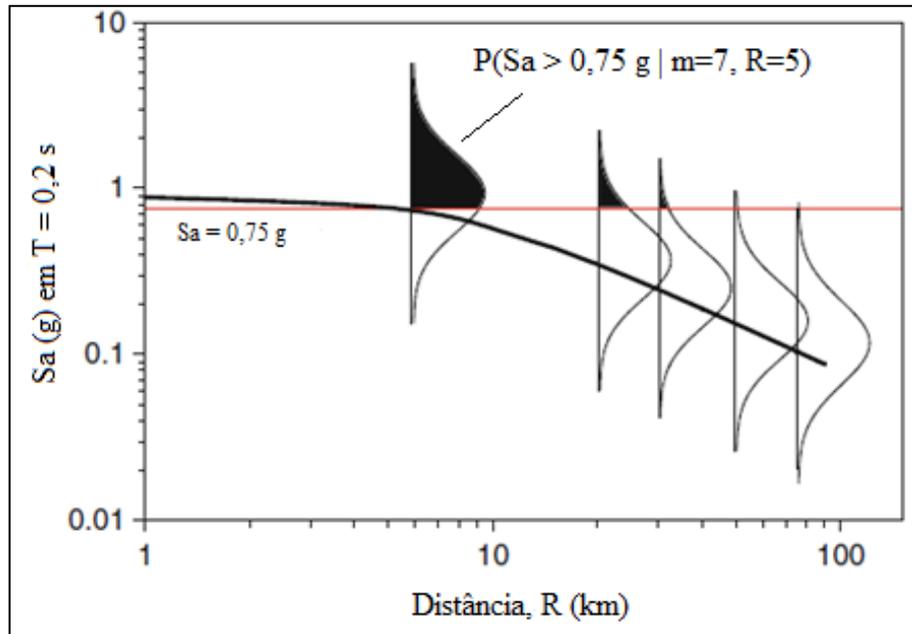


Figura 3-4 – Gráfico da aceleração espectral para  $T=0,2 s$  e  $M=7$  em função da distância e distribuição de probabilidades para as distâncias de 5, 20, 30, 50 e 75 km.

Fonte: Adaptado de SUCUOGLU e AKKAR (2014)

Vale ressaltar que a maioria dos GMPM adotam como dados de entrada somente a magnitude e a distância e os demais parâmetros são contabilizados nas incertezas do modelo. (BUDNITZ *et al.*, 1997)

### 3.1.5. Cálculo da curva de ameaça sísmica

A curva de ameaça sísmica é o resultado da análise probabilística de ameaça sísmica e consiste na relação entre o parâmetro de movimento do solo escolhido (geralmente a aceleração horizontal do solo –  $a_h$ ) e sua taxa anual de excedência em um determinado local. O seu cálculo pode ser dividido nas três etapas descritas a seguir.

- 1) Calcula-se a probabilidade de excedência de  $y$  (parâmetro de movimento do solo escolhido) através do Teorema de Probabilidade Total, lançando mão das probabilidades deduzidas nas etapas anteriores, como explicitado na Equação 3-10:

$$P(Y > y) = \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} P(Y > y|m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (3-10)$$

$P(Y > y|m, r)$  probabilidade de  $Y$  exceder  $y$  dados  $m$  e  $r$ , dada pelo GMPM escolhido

$f_M(m)$  e  $f_R(r)$  funções de distribuição de probabilidades (PDF) de magnitude e distância

- 2) Para cada fonte sísmica, multiplica-se esta probabilidade pela taxa anual de ocorrência de sismos com magnitude maior ou igual à magnitude mínima ( $m_{min}$ ) da fonte e somam-se as contribuições calculadas de cada uma delas. Obtém-se então a taxa anual de ocorrência de sismos  $\lambda$  em que o valor  $Y$  (variável) excede o valor  $y$  (dado).

$$\begin{aligned} \lambda(Y > y) &= \sum_{i=1}^{n_{fontes}} \lambda_i(M > m_{min}) \times P_i(Y > y) = \\ &= \sum_{i=1}^{n_{fontes}} \lambda_i(M > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} P_i(Y > y|m, r) f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dr dm \end{aligned} \quad (3-11)$$

- 3) Por fim, com esta equação em mãos, ao se calcular  $\lambda$  para vários valores de  $y$ , é possível traçar o gráfico  $\lambda$  x  $y$  para um determinado local, também chamada de curva de ameaça sísmica, o produto final da análise probabilística. A Figura 3-5 apresenta um exemplo deste tipo curva onde  $y$  é o valor de aceleração para o PGA. Percebe-se que a taxa anual de excedência de acelerações diminui à medida que o valor da aceleração aumenta, ou seja, acelerações maiores acontecem com menos frequência e vice-versa.  $m_{\min}$

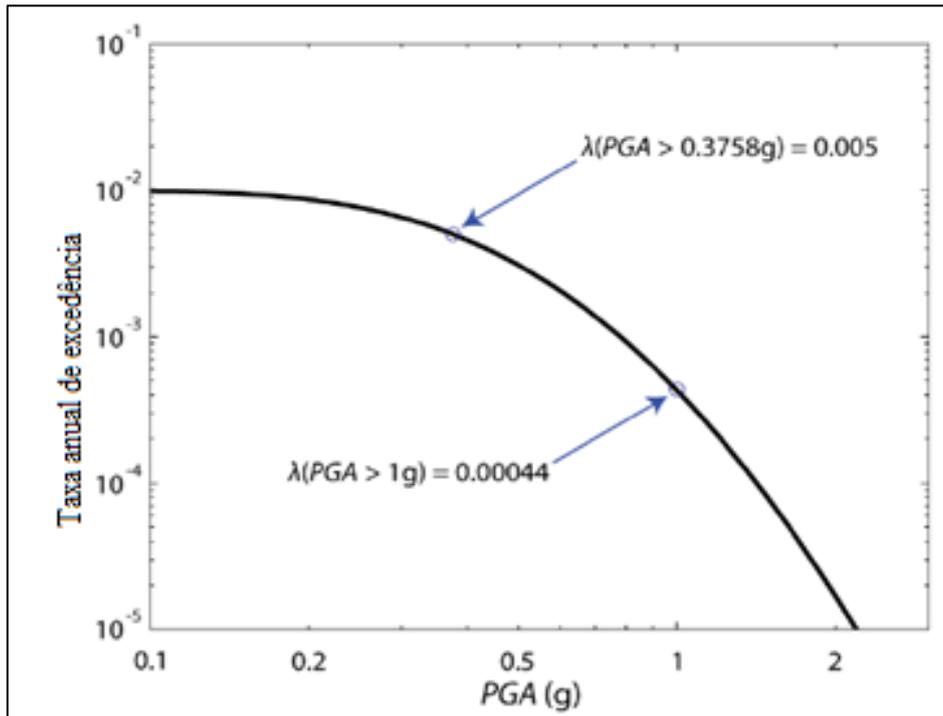


Figura 3-5 - Curva de ameaça sísmica de uma fonte sísmica qualquer em PGA.

Fonte: Adaptado de BAKER (2013)

### 3.1.6. Distribuição probabilística de terremotos no tempo

A análise probabilística pode ser formulada também em termos de probabilidades e períodos de recorrência. Após o cálculo da taxa anual de sismos que excedem o valor  $y$  do parâmetro estudado em um determinado local, é possível se estudar a distribuição temporal de suas probabilidades. A abordagem mais recorrente na literatura é o modelo de Poisson, que considera o terremoto como um evento aleatório, independente da variável tempo e com uma taxa de ocorrência constante. Em outras palavras, a chance de um terremoto ocorrer com valor de parâmetro  $y$  não depende do tempo que decorreu desde o último terremoto com mesmo valor  $y$ . A formulação de Poisson para a probabilidade de

N eventos com  $Y \geq y$  acontecerem num intervalo  $t$  em anos, dado um valor  $\lambda$  de taxa anual de ocorrência do evento, se apresenta na Equação 3-12:

$$P(N = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3-12)$$

Como estamos interessados em saber a probabilidade de um evento com  $Y \geq y$  acontecer pelo menos uma vez dentro de uma janela temporal  $t$ , num determinado local, adotando-se  $\lambda$  como sua taxa de ocorrência, podemos formular essa probabilidade da seguinte forma:

$$P(Y \geq y | T = t) = P(N \geq 1) = 1 - P(N = 0) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3-13)$$

Assim, há como se traduzir a taxa anual de ocorrência de um determinado sismo em uma probabilidade de ocorrência em uma determinada janela temporal e vice-versa. Várias normas internacionais, inclusive a brasileira, adotam a probabilidade de 10% em 50 anos como referência de projeto. Como mostrado na Equação 3-14, ao se resolver a equação acima para  $\lambda$  e substituir os valores de norma, encontra-se a taxa anual de ocorrência correspondente.

$$\lambda_{10\% \text{ em } 50 \text{ anos}} = \frac{-\ln(1 - p)}{t} = \frac{-\ln(1 - 0,10)}{50} = 0,002107 \text{ sismos por ano} \quad (3-14)$$

Portanto, com o valor de  $\lambda$  calculado e com a curva de ameaça sísmica em mãos, calcula-se o valor de  $\underline{y}$  (por exemplo aceleração horizontal -  $a_g$ ) para aquele local. Ou seja, a aceleração encontrada tem uma probabilidade de 10% de ser igualada ou ultrapassada em 50 anos naquele local, ou em outras palavras, um sismo com aceleração maior ou igual à encontrada tem uma probabilidade de 10% de ocorrer em 50 anos naquele local.

Uma alternativa ao uso de probabilidades é o uso do tempo médio de recorrência (TR), que por definição pode ser calculado como o inverso da taxa anual de ocorrência  $\lambda$ . Uma probabilidade de 10% em 50 anos é equivalente a um tempo de recorrência médio de 475 anos como demonstra-se na Equação 3-15 a seguir:

$$TR = 1/\lambda_{10\% \text{ em } 50 \text{ anos}} = 474,56 \text{ anos} \approx 475 \text{ anos} \quad (3-15)$$

O tempo de recorrência pode ser interpretado como o tempo médio esperado entre sismos com o mesmo valor ou superior do parâmetro  $y$ .

### 3.1.7. Espectro de Ameaça Uniforme

Os espectros de respostas são gráficos que representam os valores máximos de resposta de um determinado parâmetro (aceleração, velocidade, deslocamento, etc.) em um sistema com um grau de liberdade e amortecimento constante (tipicamente de 5%), para a mesma ação sísmica em várias frequências/periódos diferentes (Figura 3-6).

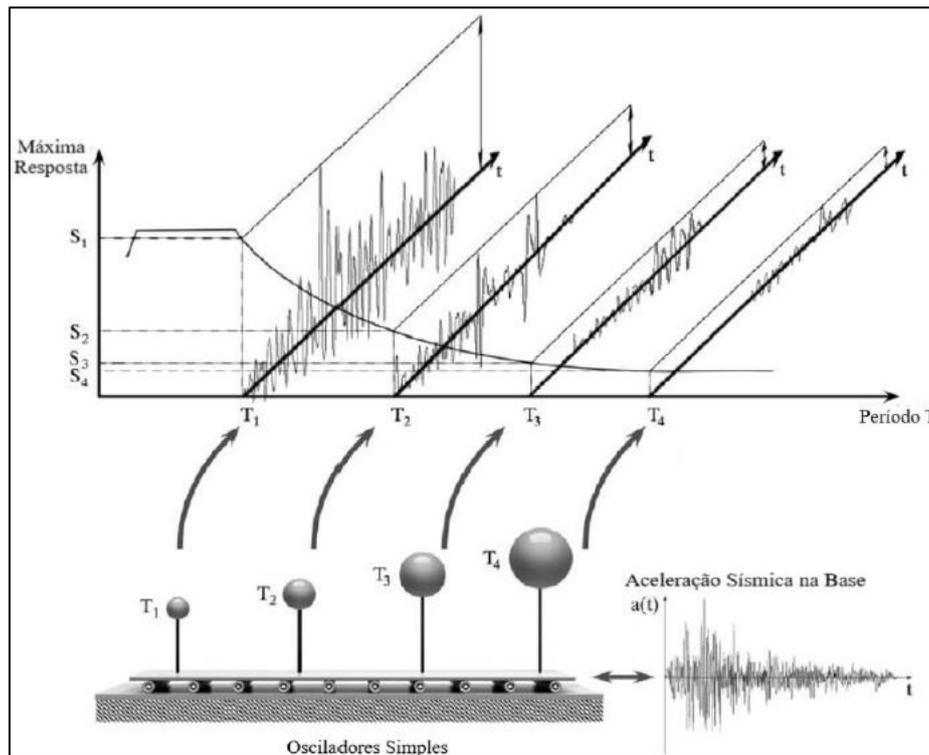


Figura 3-6 - Espectro de Resposta construído a partir dos valores máximos de aceleração espectral para cada período diferente do sistema oscilatório.

Fonte: Adaptado de VROCHIDOU et al. (2014).

Uma outra forma de se obter um espectro de resposta para um determinado local é através do PSHA, calculando o Espectro de Ameaça Uniforme (EAU). Isso pode ser feito em três etapas:

- 1) Calcula-se para cada período estrutural de interesse uma curva de ameaça sísmica usando o processo explicitado no item 3.1.5;

- 2) Fixa-se uma probabilidade (por exemplo 10% em 50 anos), que corresponde a uma taxa anual de ocorrência  $e$ , para cada curva de ameaça sísmica de períodos estruturais diferentes, computa-se o valor do parâmetro encontrado;
- 3) Representa-se graficamente cada par de parâmetro e período estrutural. Geralmente, utiliza-se como parâmetro a aceleração medida em  $g$ 's e os períodos da estrutura são medidos em segundos (Figura 3-7).

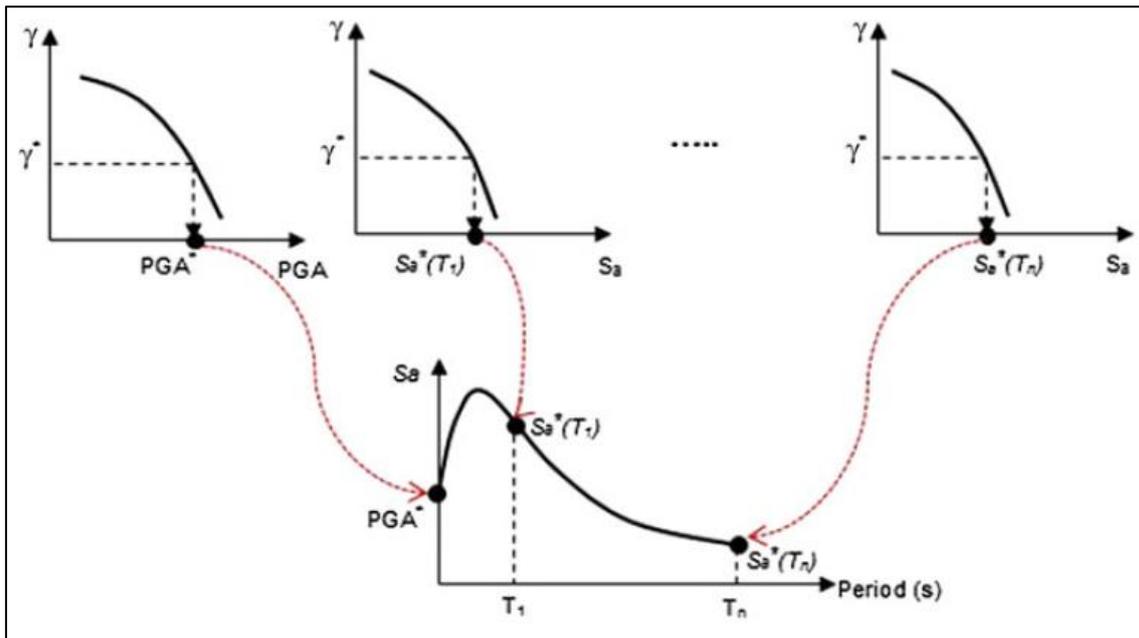


Figura 3-7 - Espectro de Ameaça Uniforme construído a partir dos valores de aceleração espectral extraídos das curvas de ameaça sísmica para uma dada probabilidade  $\gamma$ .

Fonte: SUCUOGLU e AKKAR (2014).

### 3.2. Análise Determinística da Ameaça Sísmica

Segundo SUCUOGLU e AKKAR (2014) a análise determinística da ameaça sísmica (*Deterministic Seismic Hazard Analysis – DSHA*) pode ser entendida como um caso especial da análise probabilística, uma vez que consiste na escolha de um par magnitude-distância que define qual será o sismo de projeto a ser considerado no local de interesse. O terremoto escolhido é o de maior magnitude possível na menor distância possível, considerando as fontes sismogênicas próximas ao local de projeto. Após esta escolha, calcula-se o valor dos parâmetros de projeto (aceleração, velocidade, deslocamento etc.) adotando-se um modelo de previsão de movimentos de solo (GMPM) adequado ao local.

Este processo, embora simples e muito utilizado no passado, apresenta algumas falhas e limitações e tem caído em desuso. Além de ser impossível considerar o verdadeiro caso mais desfavorável possível, ele não avalia a recorrência do terremoto nem as incertezas intrínsecas a este fenômeno (BAKER, 2013). Entretanto, segundo GUPTA (2011), dependendo do escopo do projeto, o DSHA pode ser utilizado associado ao PSHA para calibrar e testar a confiabilidade do modelo probabilístico, testar o desempenho do modelo da estrutura, além de gerar resultados complementares aos do PSHA.

### **3.3. Incertezas**

Apesar do avanço do conhecimento na área de sismologia, ainda há questões que não foram totalmente compreendidas. Tal fato tem implicações diretas nas incertezas consideradas nos modelos de análise de ameaça sísmica. Adota-se uma divisão dessas incertezas em dois grupos, que apesar de ser arbitrária, ajuda na abordagem do problema e na compreensão das distintas origens destas incertezas (BUDNITZ *et al.*, 1997).

Estes grupos de incertezas são definidos a seguir.

#### *3.3.1. Incerteza Epistêmica*

É a incerteza decorrente da atual falta de conhecimento e de dados sobre os terremotos. Em princípio, este tipo de incerteza pode ser reduzido com novas ou melhores informações sobre o assunto, por exemplo, devido às novas pesquisas e medições.

#### *3.3.2. Incerteza Aleatória*

É a incerteza inerente à natureza imprevisível dos futuros terremotos e de suas características únicas. Apesar de não conseguir reduzi-la, é possível obter uma boa estimativa sobre sua origem, seu tamanho e seu papel dentro da análise, as quais devem ser consideradas no modelo.

## 4. R-CRISIS

---

O programa de computador CRISIS foi criado em 1986 a fim de executar a análise probabilística de ameaça sísmica de forma automatizada. Vem sendo melhorado e atualizado desde então, de modo que hoje é largamente utilizado em vários trabalhos internacionais (a lista de trabalhos internacionais pode ser consultada no sítio eletrônico do R-CRISIS, 2020) e nacionais, como por exemplo por DOURADO (2014). A versão mais recente do programa, chamada R-CRISIS, está disponibilizada gratuitamente no sítio eletrônico R-CRISIS, 2020.

No presente trabalho o R-CRISIS é a principal ferramenta das análises feitas. Por isso a seguir, descrevem-se algumas funcionalidades do mesmo, baseadas no manual do programa citado como ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019).

### 4.1. Inserção de mapas e cidades

Apesar de não ser necessária a inserção de mapas e cidades para se proceder aos cálculos do programa, a visualização dos mapas sísmicos com referências a mapas geográficos ao final do processo, torna a interpretação de dados mais interessante e didaticamente mais apresentável.

Para se efetuar a inserção de mapas deve-se clicar em INPUT → MAPS → *Map File*, e escolher o arquivo desejado. Os arquivos devem estar nos formatos *\*.shp* ou *\*.asc*. Alguns mapas brasileiros no formato *shapefile* (*\*.shp*) estão disponíveis no sítio eletrônico do IBGE (2020). O arquivo do modelo (*\*.dat*), para ser aberto, depende de que o arquivo de referência do mapa (*\*.shp*) esteja no mesmo endereço informado na sua inserção no programa, por isso deve-se atentar à mudança de pasta ou à sua exclusão.

Também é possível inserir cidades através de arquivos no formato *\*.asc* com suas devidas coordenadas geográficas. Deve-se clicar em INPUT → MAPS → *Cities File*, e escolher o arquivo desejado que deve estar no modelo mostrado na Figura 4-1.

```

*Cidades Nordeste - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
7
Ceará, Fortaleza, -38.543 , -3.718
Rio Grande do Norte, Natal, -35.211 , -5.794
Paraíba, João Pessoa, -34.861 , -7.115
Pernambuco, Recife, -34.881 , -8.054
Alagoas, Maceió, -35.735 , -9.666
Sergipe, Aracaju, -37.075 , -10.910
Bahia, Salvador, -38.512 , -12.970

```

Figura 4-1 - Exemplo de arquivo de texto com dados de entrada das cidades. Número de cidades na primeira linha seguido das informações de cada cidade separadas por vírgula.

#### 4.2. Inserção da malha de cálculo

Os pontos que compõem a malha de cálculo indicam os locais para os quais serão efetuados os cálculos do programa (não confundir com a malha da fonte sísmica). Há duas formas de inserir esses pontos, ou inserindo uma malha retangular de pontos equidistantes a partir de um ponto de origem, ou inserindo as coordenadas geográficas dos pontos de interesse através de um arquivo \*.txt igual ao usado na inserção de cidades.

Para se efetuar a primeira opção, deve-se clicar em INPUT → GRID OF SITES → *Grid of Sites* e, no campo indicado na Figura 4-2, escolher as coordenadas da origem, o espaçamento horizontal e vertical (somente valores positivos são aceitos), o número de colunas e linhas e, por fim, clicar em DRAW para visualizar.

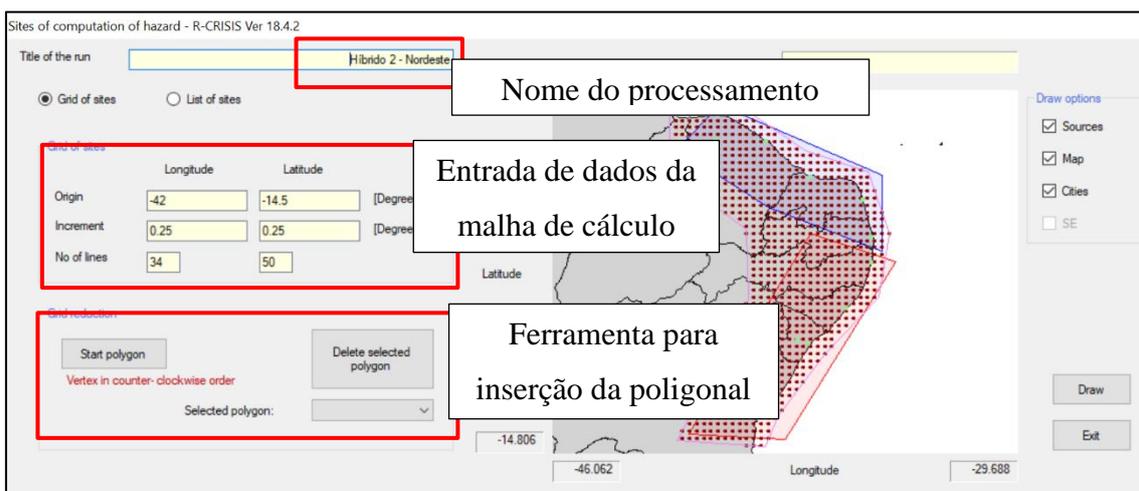


Figura 4-2 - Exemplo da aba GRID OF SITES com destaque para a entrada dos dados da malha de cálculo e de inserção da poligonal.

Há ainda a opção de desenhar uma poligonal através do botão *Start Polygon* e estabelecer, dentro da malha retangular, os pontos de interesse a serem analisados. Não é necessário fechar a poligonal de maneira exata, o programa o faz ao se clicar no botão *End Polygon*. Esta ferramenta está indicada na Figura 4-2 e, na Figura 4-3, é mostrado um exemplo de uma poligonal traçada.

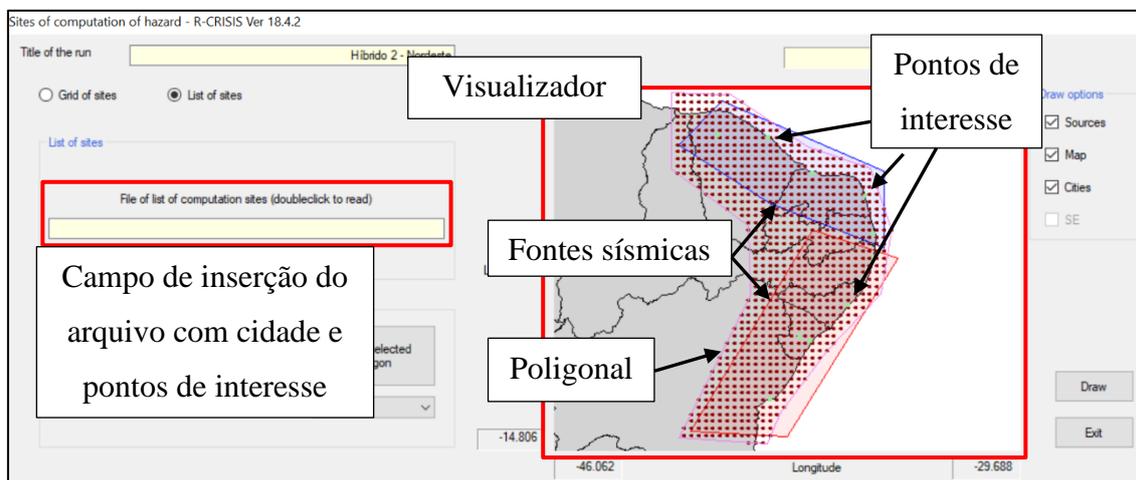


Figura 4-3 - Exemplo da aba GRID OF SITES com destaque para inserção do arquivo das cidades e pontos de interesse e para o visualizador do mapa.

Para efetuar a segunda opção deve-se clicar em INPUT → GRID OF SITES → *List of Sites* e, no campo indicado na Figura 4-3, escolher o arquivo desejado que deve estar na mesma formatação do arquivo das cidades mostrado na Figura 4-1.

### 4.3. Geometria da fonte sísmica

As opções de geometria oferecidas pelo programa são muitas, dentre elas destacam-se, as mais comumente usadas, a forma de área e a linear. Para fins práticos, somente fontes sísmicas do tipo área serão abordadas neste capítulo.

Para inserir uma fonte tipo área-fonte, deve-se clicar em INPUT → SOURCE GEOMETRY → *Source Operation*, escolher um tipo de fonte (AREA ou AREA PLANE), nomeá-la e clicar por fim em *Add new source*. A seguir, no quadro de coordenadas, deve-se inserir as coordenadas dos vértices da fonte no sentido anti-horário, assim como suas respectivas profundidades na terceira coluna. Para inserir mais pontos basta clicar com o botão direito do mouse no quadro e escolher *Insert Row*.

As áreas-fontes são consideradas com sismicidade homogênea, isto é, a probabilidade de um terremoto ocorrer é igual em toda sua extensão. Posteriormente, no processamento dos cálculos, a área-fonte fornecida é subdividida em pedaços menores, chamados *bins*, e em cada um deles é considerada a ocorrência de um terremoto modelado por uma ruptura em formato elíptico. Esta ruptura pode ser configurada através dos parâmetros contidos nesta aba *Source Geometry*, representada na Figura 4-4.

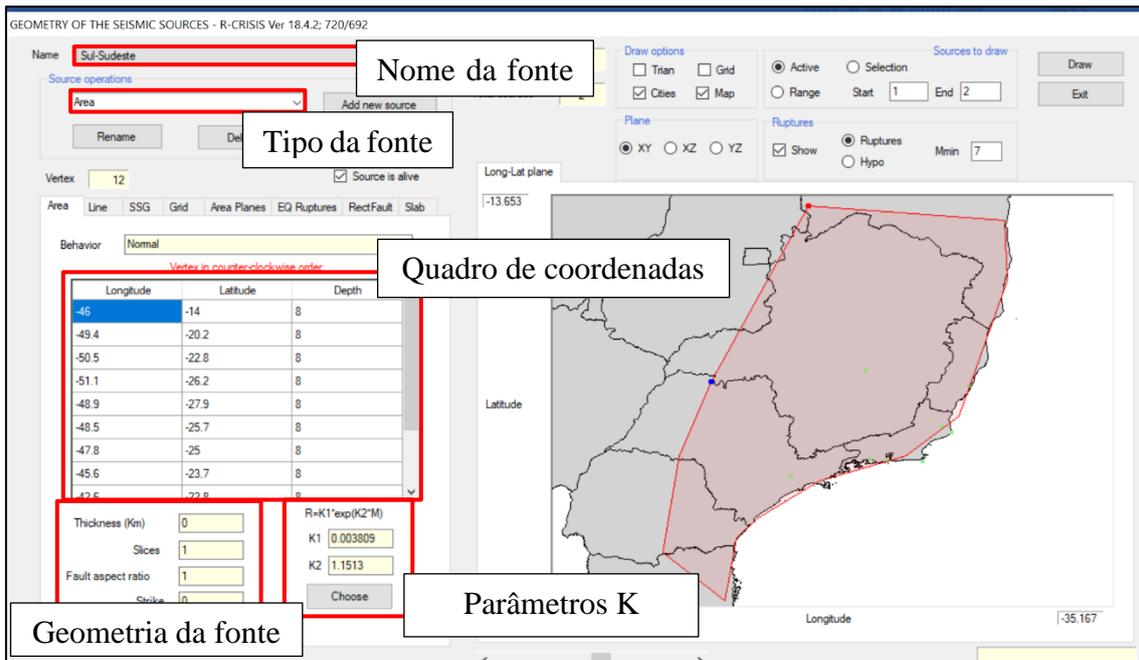


Figura 4-4 - Exemplo da aba SOURCE GEOMETRY com destaque para as informações de entrada da fonte sísmica.

A diferença entre os tipos de área-fonte disponibilizados pelo programa, AREA e AREA PLANE, é direção do plano de falha. No primeiro, esta segue a direção do plano principal da fonte e no segundo segue a direção dada pelos ângulos de mergulho (“*dip*”) e ataque (“*strike*”) configurados pelo usuário. Além destes ângulos, abaixo do quadro de coordenadas, é possível configurar a razão de aspecto (*aspect ratio*) e os parâmetros K de ruptura.

A razão de aspecto é a razão entre o eixo horizontal e vertical da elipse de ruptura, assim, uma razão igual a 1 indica que o plano de ruptura tem a forma circular e valores maiores que 1 indicam que o eixo horizontal é maior que o vertical na proporção da razão fornecida. O padrão do programa é que eixo vertical está sempre alinhado à direção de mergulho do plano de ruptura.

Os parâmetros K apresentam valores diferentes a depender do modelo escolhido e, segundo ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019), estabelecem a relação entre magnitude e área de ruptura através da Equação 4-1:

$$A_{RUP} = \pi K_1 \cdot e^{2K_2 M} \quad (4-1)$$

Esta relação é importante pois alguns GMPM usam a distância de Joyner-Boore ( $R_{JB}$ ) e a distância da ruptura ( $R_{RUP}$ ), as quais dependem desta área para serem calculadas em cada ponto.

#### 4.4. Sismicidade da fonte sísmica

Nesta aba (SOURCE SEISMICITY), podem ser inseridos os parâmetros do modelo de Gutenberg-Richter truncado para cada fonte sísmica inserida. A Figura 4-5 mostra um exemplo de preenchimento desta aba, sendo os parâmetros explicados em seguida.

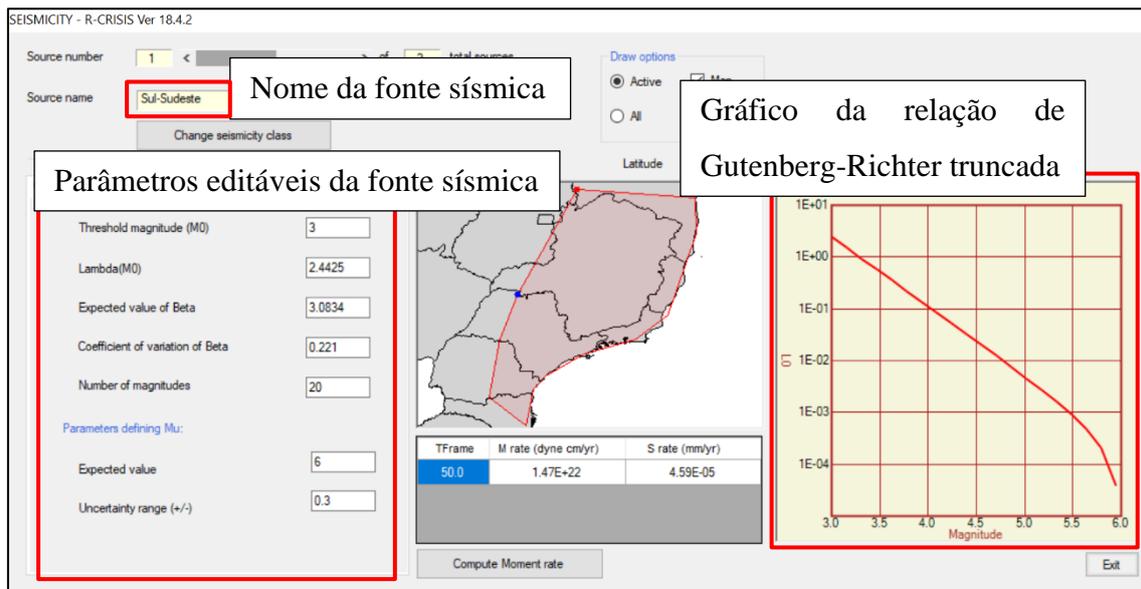


Figura 4-5 - Exemplo da aba SOURCE SEISMICITY, com detalhes dos parâmetros inseridos e do respectivo gráfico da relação Gutenberg-Richter.

*Threshold Magnitude* (M0) magnitude mínima da fonte sísmica, também chamada de  $M_{min}$

*Lambda* (M0) taxa anual de terremotos com magnitudes maiores ou igual à mínima, também chamada de  $\lambda_{Mmin}$

<i>Expected value of Beta</i>	parâmetro $\beta$ , proporcional ao parâmetro $\underline{b}$ , como explicado no item 3.1.2
<i>Number of magnitudes</i>	número de segmentos no qual a função de distribuição de probabilidades de magnitudes é discretizada
<i>Expected value of <math>M_u</math></i>	magnitude máxima da fonte sísmica, também conhecida como $M_{max}$

Segundo ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019), o programa considera  $\beta$  e  $M_{max}$  como valores esperados, pois estão associados a uma incerteza oriunda de um tratamento probabilístico. No caso de  $\beta$ , adota-se uma distribuição Gamma dos erros e sua incerteza é indicada pelo Coeficiente de Variação (*Coefficient of variation* - CoV). No caso de  $M_{max}$ , adota-se uma distribuição uniforme de probabilidades e sua incerteza é indicada pela faixa de incerteza fornecida (*Uncertainty range*).

#### 4.5. Escolha do Modelo de Previsão de Movimento do Solo (GMPM)

Existem duas formas de escolher um GMPM no programa. A primeira é a escolha de um modelo já contido no programa e a segunda é a inserção de um modelo por meio de arquivos de tabelas no formato \*.atn chamadas *Attenuation Tables*.

Para se escolher um dos modelos já contidos no programa deve-se clicar em INPUT → ATTENUATION DATA → ADD MODEL e escolher um dos modelos da lista. Os modelos são agrupados segundo o tipo de região tectônica onde se localiza a fonte sísmica e diferenciados por cores. São três os tipos principais de regiões tectônicas consideradas pelo programa: *Stable Continental Region – SCR*; *Active Shallow Crustal Region – ASCR*; e *Subduction Region – SR*.

Além dos vários parâmetros configuráveis característicos de cada modelo, há dois parâmetros que podem sempre ser configurados em todos eles, *Sigma truncation* e *Units coefficient*. O primeiro existe para evitar um trabalho computacional desnecessário, isto é, pode-se configurar um limite (truncamento) em termos da quantidade de desvios padrões (sigma) para o cálculo da integral da função de atenuação, ao invés de fazê-lo considerando o infinito como limite. O segundo compatibiliza a unidade de entrada das funções de atenuação com a unidade escolhida pelo usuário. Por exemplo, se a função

trabalhar em  $\text{cm/s}^2$  e o usuário desejar obter os resultados em g, é necessário inserir um fator de 981 ( $1 \text{ g} = 981 \text{ cm/s}^2$ ) no campo *Units coefficient*.

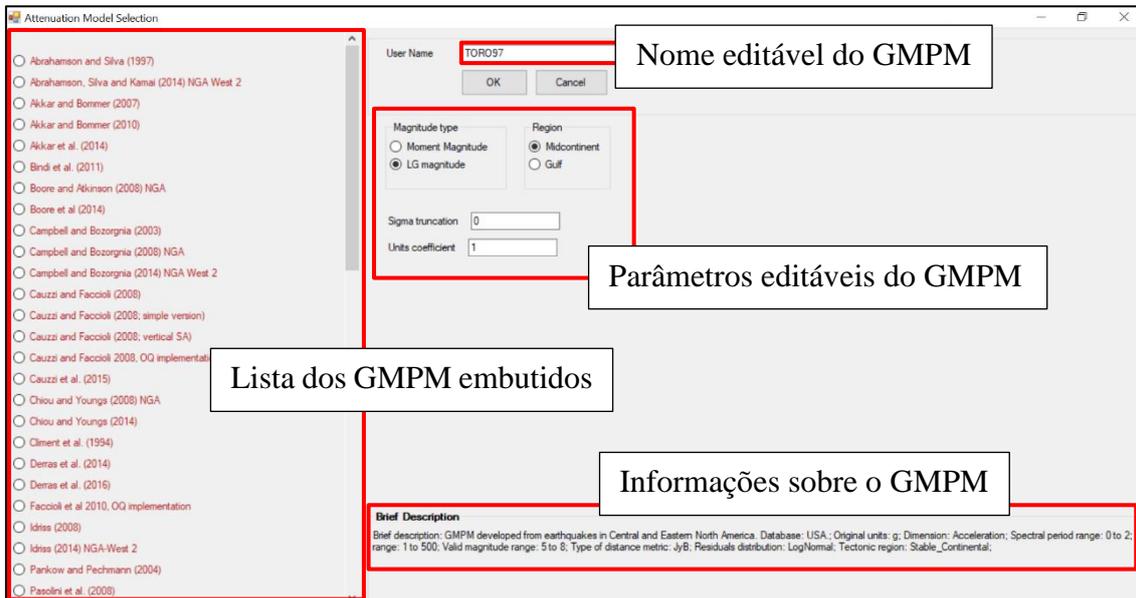


Figura 4-6 - Exemplo da aba secundária para escolha de um GMPM embutido no programa, dentro da aba ATTENUATION DATA.

Para se inserir um novo GMPM no programa deve-se produzir um arquivo no formato \*.atn (Figura 4-7), de acordo com as formatações indicadas por ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019) e então clicar em INPUT → ATTENUATION DATA → ADD MODEL → *Attenuation table* e escolher o arquivo criado (Figura 4-8).

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda						
#	:Description	:Atkinson and Boore (2011)				
#	:Units	:cm/s^2				
#	:Distribution	:2				
#	:Dimension	:Acceleration				
3.5	8.0	10				
1.0	1000	30	4			
0.010	0.69077	0	0			
1.2332E+03	8.3937E+02	5.7127E+02	3.8876E+02	2.6453E+02	1.7997E+02	
2.5048E+01	1.4987E+01	8.9603E+00	5.3516E+00	3.1921E+00	1.9009E+00	
4.1073E-01	3.5102E-01	2.0631E-01	1.1992E-01	6.8726E-02	3.8691E-02	
2.0767E+03	1.4518E+03	1.0148E+03	7.0932E+02	4.9572E+02	3.4639E+02	
5.4955E+01	3.3511E+01	2.0418E+01	1.2428E+01	7.5546E+00	4.5847E+00	

Figura 4-7 - Exemplo de arquivo formato \*.atn com *Attenuation Table*.

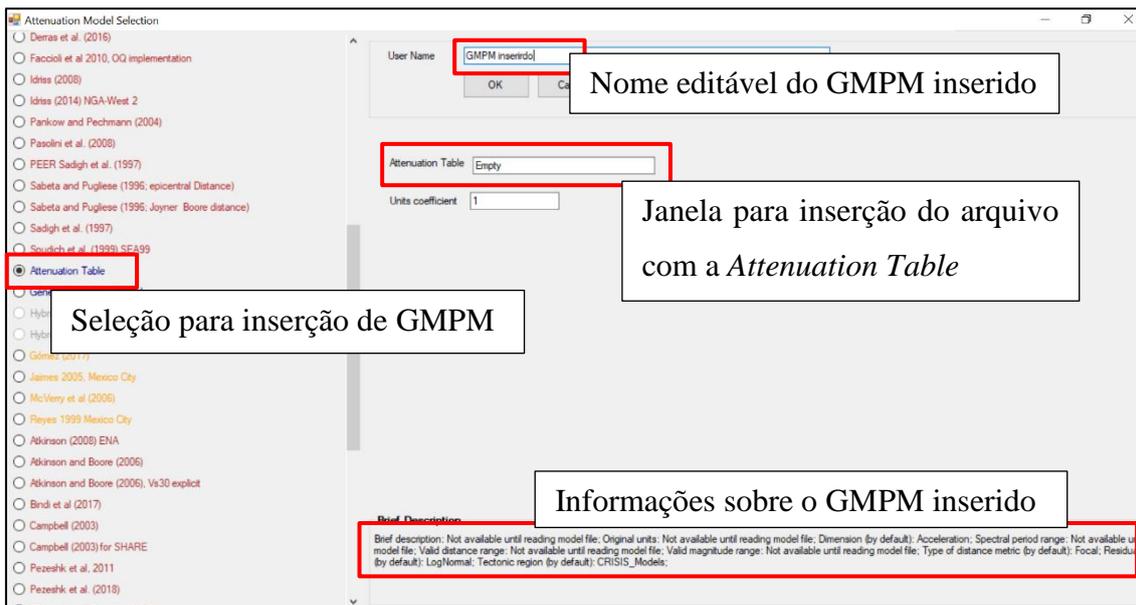


Figura 4-8 - Exemplo da aba secundária para inserção de novo GMPM através de uma *Attenuation Table*.

Após adicionar todos os modelos que serão utilizados nos cálculos, deve-se atribuí-los às fontes sísmicas. Para tanto, deve-se clicar primeiro em INPUT → ATTENUATION DATA → *Source for model assignment*, para escolher o número de identificação da fonte sísmica e posteriormente clicar em INPUT → ATTENUATION DATA → *General model* para escolher o modelo correspondente à fonte selecionada. A Figura 4-9 mostra um exemplo de atribuição de GMPM a uma fonte sísmica.

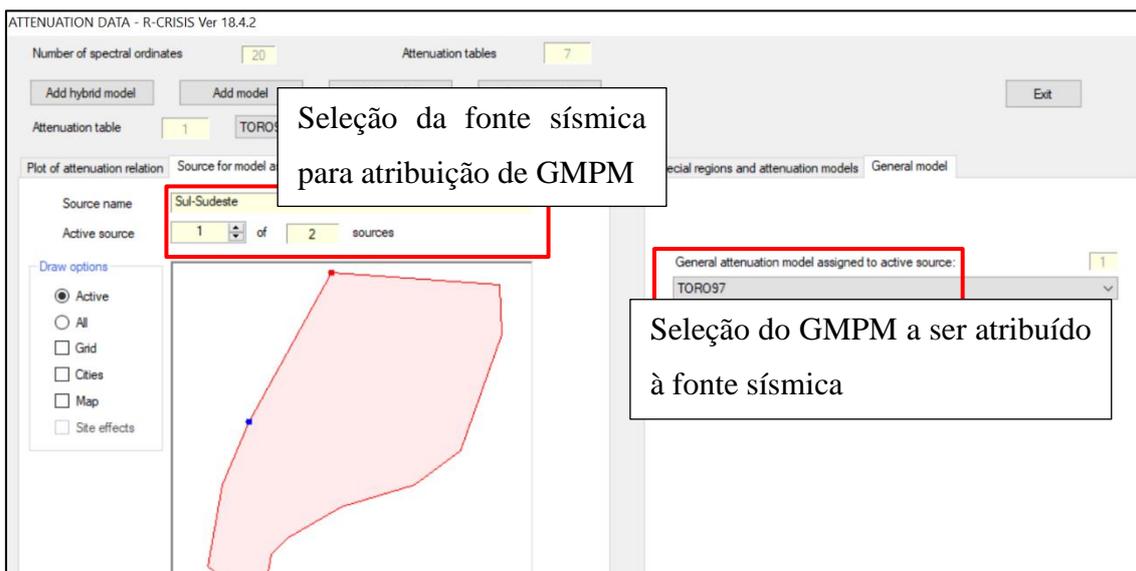


Figura 4-9 - Exemplo da aba ATTENUATON DATA, com destaque para atribuição de GMPM à fonte sísmica.

#### 4.6. Configuração das ordenadas espectrais

Os períodos estruturais que serão investigados na PSHA são chamados de ordenadas espectrais e podem ser configurados na aba SPECTRAL ORDINATES. Como a aceleração é o parâmetro do terremoto de maior interesse nas PSHA, para fins didáticos será definida a partir de agora como o parâmetro escolhido da análise. Esta, entretanto, pode ser substituída por qualquer outra, como velocidade ou deslocamento. A Figura 4-10 mostra um exemplo desta aba e, em seguida, os parâmetros são explicados.

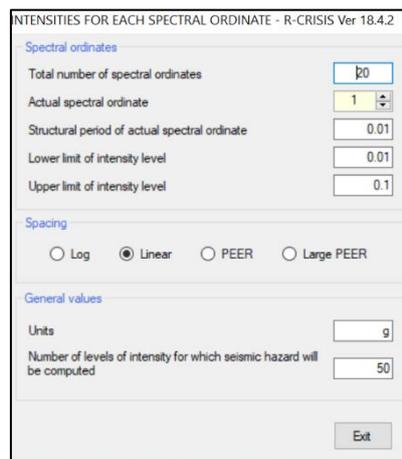


Figura 4-10 - Exemplo da aba SPECTRAL ORDINATES.

<i>Total number of spectral ordinates</i>	Número total de períodos a serem investigados.
<i>Structural period of actual spectral ordinate</i>	Valor do período estrutural medido em segundos.
<i>Lower limit of intensity level</i>	Limite inferior da faixa de valores de aceleração.
<i>Upper limit of intensity level</i>	Limite superior da faixa de valores de aceleração.
<i>Spacing</i>	Tipo de espaçamento usado ao dividir a faixa de valores de aceleração.

<i>Units</i>	Unidade da aceleração. Esse campo serve somente como referência para o usuário, pois não é considerado em nenhum cálculo.
<i>Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed</i>	Número de divisões que será aplicado à faixa de valores da aceleração.

Esses parâmetros determinam para quais pares de aceleração e período estrutural serão computadas as probabilidades de excedência, portanto, quanto maior a quantidade de pares, maior o esforço computacional associado.

A fim de se obter resultados coerentes, a faixa de valores da aceleração deve ser compatível com os valores de probabilidade investigados. Essa compatibilização deve ser feita para cada período estrutural.

#### **4.7. Configuração dos parâmetros globais**

Nesta aba (GLOBAL PARAMETERS), podem ser configurados parâmetros mais genéricos que definem aspectos globais do cálculo a ser executado. Na parte superior da aba, define-se a distância máxima a ser considerada na integral de cálculo da curva de ameaça sísmica, além do grau de discretização da malha da fonte sísmica. Na parte inferior da aba, definem-se os períodos de recorrência e a janela temporal, usadas no cálculo da taxa anual de recorrência de sismos e na construção do Espectro de Ameaça Uniforme. A seguir, são explicados os parâmetros mostrados no exemplo de preenchimento da Figura 4-11.

<i>Maximum integration distance</i>	Distância máxima de integração, distância máxima para se considerar o efeito da fonte sísmica.
-------------------------------------	--

*Minimum triangle size*

Tamanho mínimo do triângulo. Tamanho do triângulo é calculado como a raiz quadrada da área.

*Minimum Distance/Triangle Size ratio*

Razão mínima entre a distância do centroide da fonte ao local de interesse e o tamanho do triângulo.

*Time Frame*

Janela temporal medida em anos (t).

*Map return period (years)*

Período de recorrência medido em anos (TR).

*PE in 'Time Frame' years*

Probabilidade de excedência em 't' anos.

GLOBAL PARAMETERS - R-CRISIS Ver 18.4.2

Integration parameters

Maximum integration distance  km

Minimum triangle size  km

Minimum Distance/Triangle Size ratio

CAV filter

Time frame
1
50
100

Map return period (years)	PE in 1 years	PE in 50 years	PE in 100 years
100	9.95E-03	3.93E-01	6.32E-01
475	2.10E-03	9.99E-02	1.90E-01
2475	4.04E-04	2.00E-02	3.96E-02
10000	1.00E-04	4.99E-03	9.95E-03
100000	1.00E-05	5.00E-04	1.00E-03

Exit

Figura 4-11 - Exemplo da aba GLOBAL PARAMETERS.

A discretização da fonte sísmica (área-fonte), segundo ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019), é feita dividindo a área inicial em triângulos cada vez menores até que se atinja uma das duas condições a seguir:

- 1) O tamanho do triângulo é menor do que o tamanho mínimo fornecido pelo usuário. Esta condição estabelece uma área máxima das subdivisões da área-fonte;
- 2) A razão entre a distância do centroide da fonte ao local de interesse e o tamanho do triângulo é maior do que a fornecida pelo usuário. Esta condição estabelece um limite máximo para a razão distância/tamanho, ou seja, não haverá fontes (triângulos) pequenas a grandes distâncias, nem fontes (triângulos) grandes a curtas distâncias.

Se nenhuma das duas condições é atingida, o triângulo (fonte) é dividido em quatro novos triângulos, conectando os pontos médios de cada lado, e o teste é feito novamente para cada triângulo novo.

No campo *Time Frame* é possível adicionar mais de um valor para a janela temporal, clicando com botão direito e escolhendo *Insert Row*. No campo *Map return period (years)* é possível escolher até cinco períodos de recorrência (TR) diferentes; para cada um deles aparecerá a probabilidade de excedência correspondente, calculada automaticamente para cada janela temporal inserida.

#### **4.8. Definição dos arquivos de saída**

Após a configuração de todos os parâmetros de cálculo, é possível definir os tipos de arquivos de saída que serão gerados no processamento. Deve-se clicar em INPUT → SET OUTPUT FILES (*Optional*) e selecionar os arquivos de interesse. A seguir, são explicadas as opções de arquivo mostradas no exemplo de preenchimento da Figura 4-12.

- \*.*gra* contém a taxa de excedência de cada local de interesse para cada janela temporal definida. A partir das informações contidas neste arquivo é possível construir a curva de ameaça sísmica (aceleração x probabilidade de excedência) para cada janela temporal definida.

- \**.fue* contém a taxa de excedência de cada local de interesse dividido por fonte sísmica, isto é, contém a contribuição de cada fonte sísmica para a probabilidade de excedência. A partir das informações contidas neste arquivo é possível construir a curva de ameaça sísmica (aceleração x probabilidade de excedência) de cada local de interesse para cada fonte sísmica e investigar a contribuição de cada fonte na probabilidade de excedência do local.
- \**.map* contém os pontos que formam o Espectro de Ameaça Uniforme para cada nível de ameaça inserido. Entende-se como nível de ameaça, a probabilidade de excedência escolhida para o projeto, ou ainda o tempo de recorrência equivalente à esta probabilidade.
- \**.smx* contém a tabela das máximas acelerações possíveis para cada local de interesse. Tais valores são calculados computando a aceleração para cada combinação de distância e magnitude possível em um determinado local e escolhendo o maior deles.
- \**.des* contém as tabelas do perigo desagregado, isto é, as tabelas que indicam quais combinações de magnitude e distância contribuem mais para a ameaça sísmica em um determinado local de interesse.

Além destes arquivos selecionáveis supracitados, cada modelo rodado pelo R-CRISIS obrigatoriamente gera um arquivo no formato *\*.res*, o qual contém informações que identificam o modelo junto a um resumo dos dados de entrada.

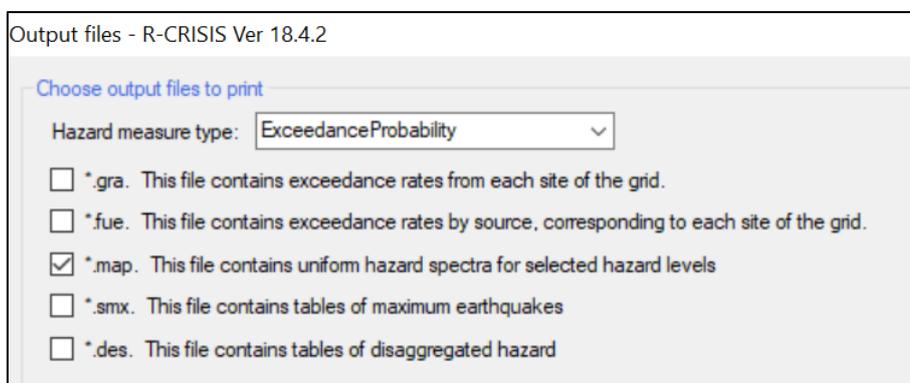


Figura 4-12 - Exemplo da aba SET OUTPUT FILES.

#### 4.9. Processamento e resultados

Por fim, após definir todos os dados de entrada, o processamento é feito clicando em RUN → VALIDATE AND RUN → RUN. Caso o modelo apresente algum tipo de erro, ele será mostrado nesta aba. O processamento consegue ser executado a despeito da existência de avisos (*warnings*), entretanto é impossibilitado quando há erros (*errors*) identificados. As Figuras 4-13 e 4-14 mostram as duas situações respectivamente.

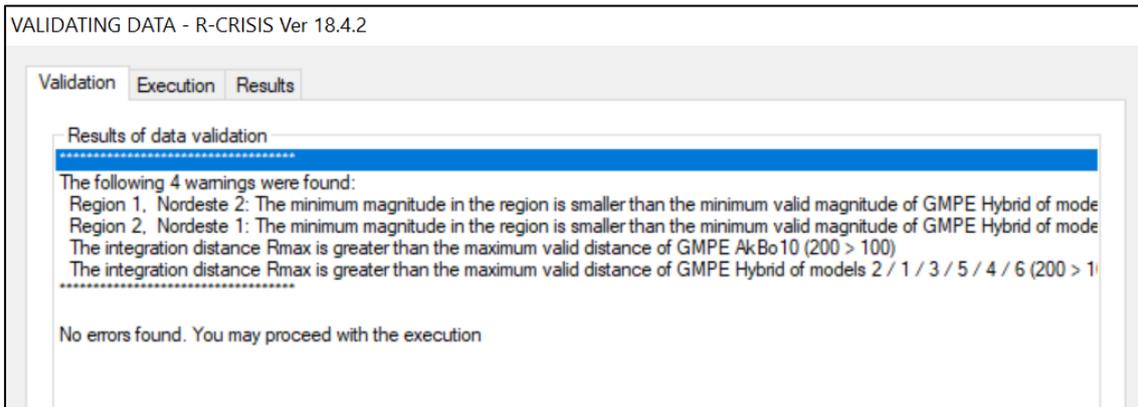


Figura 4-13 - Exemplo da aba VALIDATE AND RUN, com destaque para os avisos.

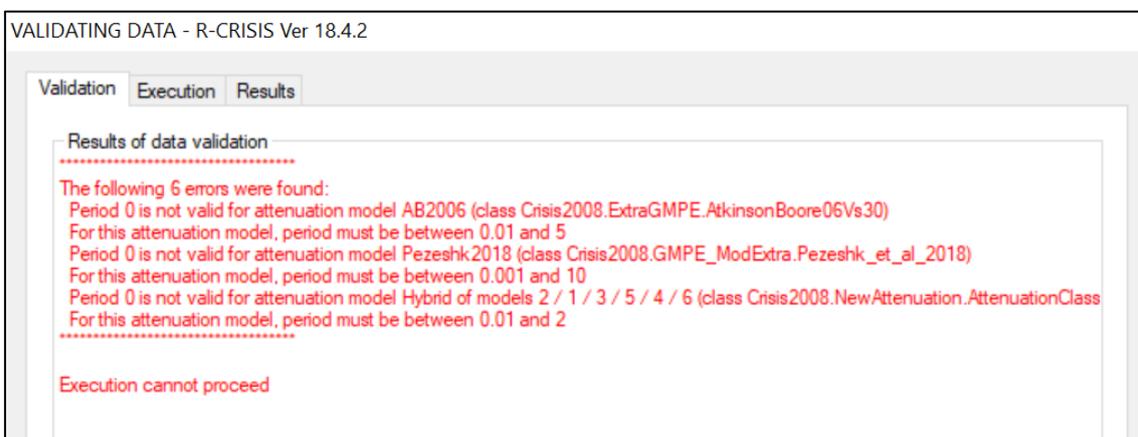


Figura 4-14 - Exemplo da aba VALIDATE AND RUN, com destaque para os erros.

Os diversos tipos de resultados podem ser consultados na aba HAZARD, dos quais os mais importantes são os Mapa de Ameaça Sísmica (*Hazard Map*) e o Mapa de Desagregação (*Disaggregation Chart*), mostrados respectivamente nas Figuras 4-15 e 4-16.

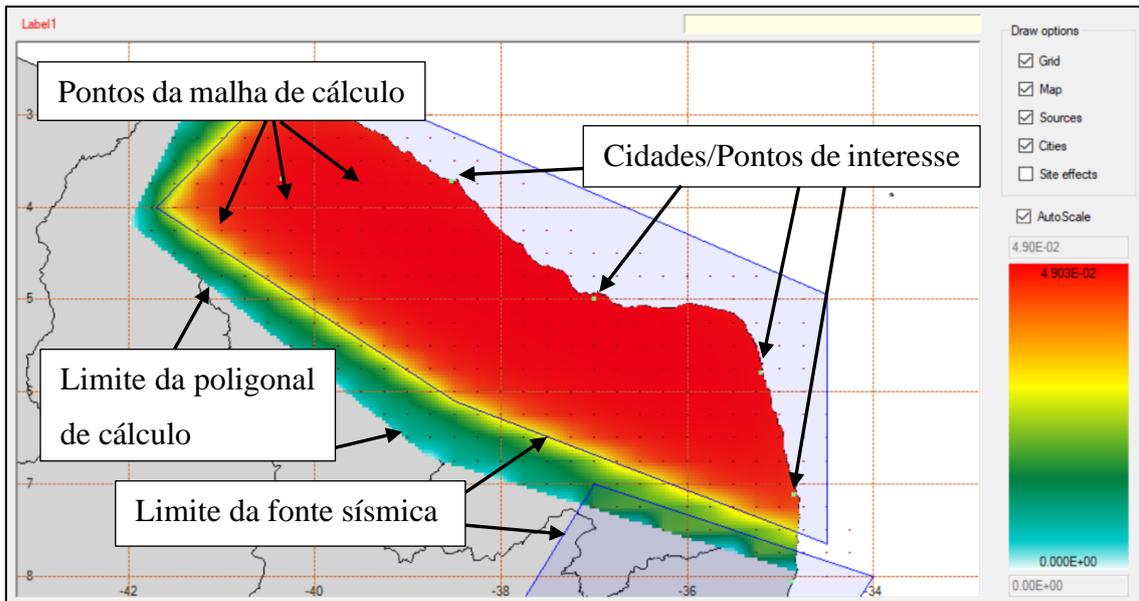


Figura 4-15 - Exemplo de Mapa de Ameaça Sísmica com destaque para as cidades, fonte sísmica e a malha de cálculo.

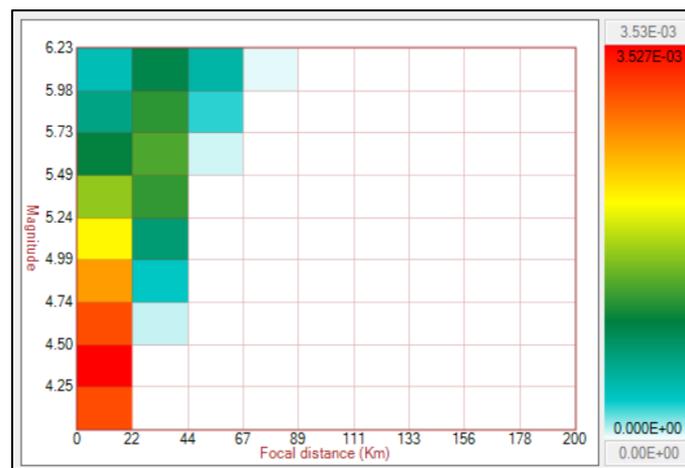


Figura 4-16 - Exemplo de Mapa de Desagregação para um dado ponto de interesse.

Dentro do mapa de ameaça sísmica é possível gerar e salvar, para cada ponto escolhido, a Curva de Ameaça Sísmica e o Espectro de Ameaça Uniforme correspondente, mostrados na Figura 4-17.

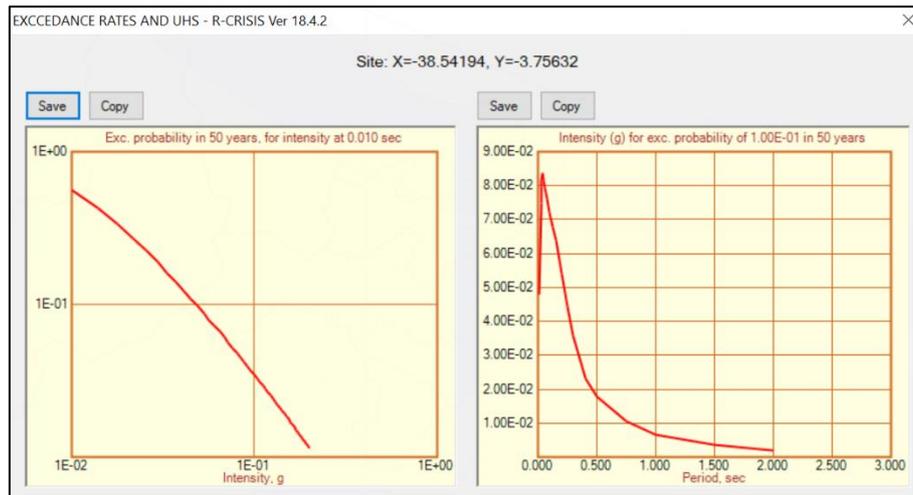


Figura 4-17 - Exemplo de Curva de Ameaça Sísmica e Espectro de Ameaça Uniforme para um dado ponto de interesse.

## 5. REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES

---

Neste capítulo, os trabalhos de SILVA (2009) e SILVA (2018) serão revisados a partir do processamento dos dados de entrada por eles usados, utilizando-se o programa R-CRISIS e, ao final, os resultados serão comparados.

### 5.1. Fernanda Cristina Moreira da SILVA (2009)

Neste trabalho a autora estudou a sismicidade das regiões Nordeste e Sudeste do Brasil, lançando mão de um procedimento manual para o cálculo das recorrências sísmicas e das distribuições probabilísticas das acelerações espectrais das duas regiões. Além disso, traçou os espectros de resposta de ambas, os quais serão comparados aos Espectros de Ameaça Uniforme (EAU) obtidos pelo R-CRISIS.

Os dados de entrada usados por SILVA (2009) da região Nordeste são:

- a) Área-fonte em formato de polígono com cinco vértices com coordenadas segundo a Tabela 5-1 (dados não fornecidos no trabalho de origem, valores aproximados obtidos visualmente nas figuras do trabalho).

Tabela 5-1 - Vértices da área-fonte 'Nordeste' de SILVA (2009)

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-41,00	-3,00
2	-41,00	-4,00
3	-37,50	-6,00
4	-37,50	-4,50
5	-40,00	-3,00

- b) Relação de Gutenberg-Richter:

$$\log \lambda_m = 2,92 - 1,01 \cdot m, \quad 3,5 \leq m \leq 7,0$$

- c) GMPM: TORO *et al.* (1997), coeficientes relativos à região *midcontinent* e à escala  $m_{Lg}$  de magnitude.

Os dados de entrada usados por SILVA (2009) da região Sudeste são:

- a) Área-fonte em formato de polígono com cinco vértices com coordenadas segundo a Tabela 5-2 (dados não fornecidos no trabalho de origem, valores aproximados obtidos visualmente nas figuras do trabalho).

Tabela 5-2 - Vértices da área-fonte ‘Sudeste’ de SILVA (2009)

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-44,00	-14,00
2	-52,00	-22,00
3	-48,00	-25,00
4	-42,00	-23,00
5	-39,00	-18,50

- b) Relação de Gutenberg-Richter:

$$\log \lambda_m = 4,44 - 1,28 \cdot m, \quad 3,5 \leq m \leq 7,0$$

- c) GMPM: TORO *et al.* (1997), coeficientes relativos à região *midcontinent* e escala  $m_{Lg}$  de magnitude.

## 5.2. Rafael Henrique Moreira da SILVA (2018)

Neste trabalho o autor estudou com mais detalhes a sismicidade da região Sudeste do Brasil, considerando novos dados de terremotos na plataforma continental. A análise probabilística foi feita adaptando uma Análise de Confiabilidade ao problema de previsão de terremotos e também traçando espectros de resposta, que serão comparados aos EAU gerados pelo R-CRISIS.

Os dados de entrada usados por SILVA (2009) para a região Sudeste são:

- a) Foram consideradas duas áreas-fontes, uma relativa à sismicidade da Zona Terrestre e outra à da Zona Marítima. A primeira em formato de polígono com sete vértices e a segunda com nove. As coordenadas são mostradas nas Tabelas 5-3 e 5-4 (dados não fornecidos no trabalho de origem, valores aproximados obtidos visualmente nas figuras).

Tabela 5-3 - Vértices da área-fonte ‘Zona Terrestre’ de SILVA (2018)

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-40,00	-20,00
2	-45,00	-20,00
3	-47,50	-21,00
4	-49,50	-25,00
5	-48,00	-26,00
6	-46,50	-25,00
7	-42,00	-23,00

Tabela 5-4 - Vértices da área-fonte ‘Zona Marítima’ de SILVA (2018)

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-50,00	-32,00
2	-49,00	-32,50
3	-45,50	-28,00
4	-39,50	-24,00
5	-36,00	-20,00
6	-36,00	-19,00
7	-42,00	-23,00
8	-46,50	-25,00
9	-48,00	-27,00

b) Relações de Gutenberg-Richter:

Zona Terrestre:  $\log \lambda_m = 3,9969 - 1,3113 \cdot m, \quad 3,0 \leq m \leq 6,0$

Zona Marítima:  $\log \lambda_m = 2,4759 - 0,7629 \cdot m, \quad 3,0 \leq m \leq 7,0$

c) GMPM: TORO *et al.* (1997), coeficientes relativos à região *midcontinent* e à escala  $m_{Lg}$  de magnitude.

### 5.3. Processamento com R-CRISIS

Além dos dados característicos da região apresentados acima, outros dados básicos de entrada foram considerados a fim de se preencher todos os campos necessários ao processamento pelo R-CRISIS.

### 5.3.1. Locais de interesse e pontos críticos

Os locais de interesse são os pontos escolhidos para os quais serão traçadas as Curvas de Ameaça Sísmica e os EAU. No presente trabalho, escolheram-se os pontos que apresentam os valores de aceleração espectral mais desfavoráveis da região, chamados de pontos críticos. No trabalho de SILVA (2009), tais pontos não foram explicitados, por isso adotou-se os centroides de cada área-fonte. SILVA (2018), por sua vez, adotou a cidade de Cabo Frio como o ponto crítico de sua análise. A Tabela 5-5, resume as coordenadas de cada ponto de interesse nos trabalhos de SILVA (2009) e SILVA (2018).

Tabela 5-5 – Resumo dos pontos críticos de SILVA (2009) e SILVA (2018)

ÁREA-FONTE	LONGITUDE	LATITUDE
SILVA (2009) – Nordeste	-39,60	-9,00
SILVA (2009) – Sudeste	-44,00	-19,00
SILVA (2018) – Cabo Frio	-42,029	-22,966

### 5.3.2. Geometria da fonte sísmica

As coordenadas dos polígonos que compõem as áreas-fontes foram apresentadas nos itens 5.1 e 5.2 e a profundidade adotada para todos os pontos foi de 8 km.

A área-fonte ‘Zona Terrestre’ foi ligeiramente alterada para fechar o espaço entre ela e a área-fonte ‘Zona-Marítima’ próximo à cidade de Cabo Frio e assim permitir que ambas as fontes cubram toda a área no entorno destes neste ponto de interesse. A coordenada do vértice 1 da ‘Zona Terrestre’ foi alterada para -39,00° LONG; -21,00° LAT e a área total permaneceu a mesma, como mostrado na Figura 5-1.

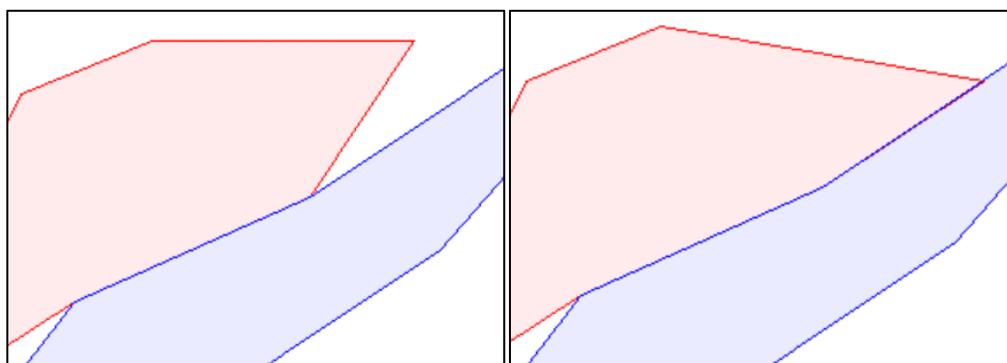


Figura 5-1 – Detalhe do ajuste na área-fonte de SILVA (2018).

Os coeficientes K escolhidos foram os relativos ao trabalho de BRUNE (1970), pois em TORO *et al.* (1997), o GMPM usado nesta análise, também utiliza as equações dadas nesta mesma fonte.

### 5.3.3. Sismicidade da fonte sísmica

Os dados das relações de Gutenberg-Richter, apresentados nos itens 5.1 e 5.2, foram transformados para a forma compatível ao R-CRISIS, segundo as seguintes relações:

$$\lambda_{M_{min}} = 10^{a-b \cdot M_{min}} \quad e \quad \beta = b \cdot \ln 10$$

Os dados probabilísticos (coeficiente de variação e intervalo de incerteza) para o processamento de SILVA (2018) são os mesmos utilizados por DOURADO (2014), uma vez que este trabalho serviu como base para o primeiro. No caso de SILVA (2009), esses dados foram suprimidos, pois não há uma consideração de incertezas em seu trabalho. Na Tabela 5-6, há o resumo destes dados de entrada para cada autor e área-fonte.

Tabela 5-6 – Resumo dos dados de sismicidade de SILVA (2009) e SILVA (2018)

ÁREA-FONTE	M <sub>min</sub>	λ <sub>min</sub>	β	CoV de β	Quantidade de magnitudes	M <sub>max</sub>	Intervalo de incerteza de M <sub>max</sub>
SILVA (2009) Nordeste	3,5	0,24266	2,3256	0,0	7	7,0	0,0
SILVA (2009) Sudeste	3,5	0,912	2,9473	0,0	7	7,0	0,0
SILVA (2018) Zona Terrestre	3,0	1,156	3,0193	0,312	20	6,0	0,3
SILVA (2018) Zona Marítima	3,0	1,539	1,7568	0,223	20	7,0	0,3

### 5.3.4. GMPM

Como já exposto nos itens 5.1 e 5.2, o modelo de previsão de movimento do solo escolhido por ambos os autores, para todas as áreas-fontes, é o de TORO *et al.* (1997) com as opções de ‘LG Magnitude’ e ‘Midcontinent’ marcadas, o mesmo modelo usado por ALMEIDA (2002). A opção ‘LG Magnitude’ é escolhida, pois a escala mbLG é compatível com a escala mb, segundo CHUNG e BERNREUTER (1981), e escala mb por sua vez é compatível, segundo ASSUMPCÃO (1983), com a escala mR usada no Catálogo Sísmico Brasileiro.

### 5.3.5. Ordenadas Espectrais

Os parâmetros da aba ‘Ordenadas Espectrais’ foram escolhidos seguindo ao máximo os dados originais dos autores. Entretanto, no caso de SILVA (2018), nem todas as informações estavam explícitas, por isso, foram escolhidos valores que conseguem um maior detalhamento dos resultados, sem que se aumentasse muito o tempo de processamento. Nas Tabelas 5-7 e 5-8, há o resumo destes parâmetros para cada autor.

Tabela 5-7 – Resumo das Ordenadas Espectrais para SILVA (2009).

<b>Número de divisões da aceleração</b>	16	<b>Número de ordenadas espectrais</b>	8	
<b>Espaçamento</b>	Log	<b>Ordenadas espectrais</b>	<b>Nº</b>	<b>T (s)</b>
<b>Limite inferior da aceleração</b>	0,0001		1	0
			2	0,0286
			3	0,04
<b>Limite superior da aceleração</b>	1		4	0,1
			5	0,2
			6	0,4
<b>Unidade de aceleração</b>	g		7	1,0
		8	2,0	

Tabela 5-8 – Resumo das Ordenadas Espectrais para SILVA (2018).

<b>Número de divisões da aceleração</b>	40	<b>Número de ordenadas espectrais</b>	8	
<b>Espaçamento</b>	Linear	<b>Ordenadas espectrais</b>	<b>Nº</b>	<b>T (s)</b>
<b>Limite inferior da aceleração</b>	0,01		1	0
			2	0,0286
			3	0,04
<b>Limite superior da aceleração</b>	0,2		4	0,1
			5	0,2
			6	0,4
<b>Unidade de aceleração</b>	g		7	1,0
		8	2,0	

### 5.3.6. Parâmetros globais

A distância máxima de integração não é definida por SILVA (2009), por isso adotou-se, neste processamento, o valor de 500 km sugerido por BUDNITZ *et al.* (1997). Este recomenda a identificação de falhas até este valor para a região leste norte-americana, região com características sísmicas semelhantes à brasileira. No caso de SILVA (2018), adotou-se a distância de 200 km usada pelo próprio autor.

No caso da discretização da malha da fonte, optou-se por não seguir os valores utilizados por SILVA (2009), pois, uma vez que os métodos se diferem neste aspecto, ele será utilizado como fator de comparação entre os mesmos. Por fim, os tempos de recorrência investigados são os mesmos utilizados pelos autores, 475 e 2475 anos, ou seja, 10% e 2% de probabilidade de excedência em 50 anos, respectivamente.

Na Tabela 5-9, apresenta-se o resumo dos parâmetros globais escolhidos.

Tabela 5-9 – Resumo dos Parâmetros Globais

<b>Autor</b>	<b>Distância máxima de integração (km)</b>	<b>Tamanho mínimo do triângulo (km)</b>	<b>Razão mínima distância/tamanho de triângulo</b>	<b>Janela temporal (anos)</b>	<b>Tempo de recorrência (anos)</b>
SILVA (2009)	500	10	7	50	475 e 2475
SILVA (2018)	200	10	7	50	475 e 2475

### 5.4. Comparação de resultados

Após o processamento no R-CRISIS dos dados de entrada expostos nos itens 5.1, 5.2 e 5.3, obtiveram-se os valores das acelerações espectrais para cada período da estrutura e traçou-se o EAU correspondente. A seguir, os resultados obtidos são comparados aos de SILVA (2009) e de SILVA (2018).

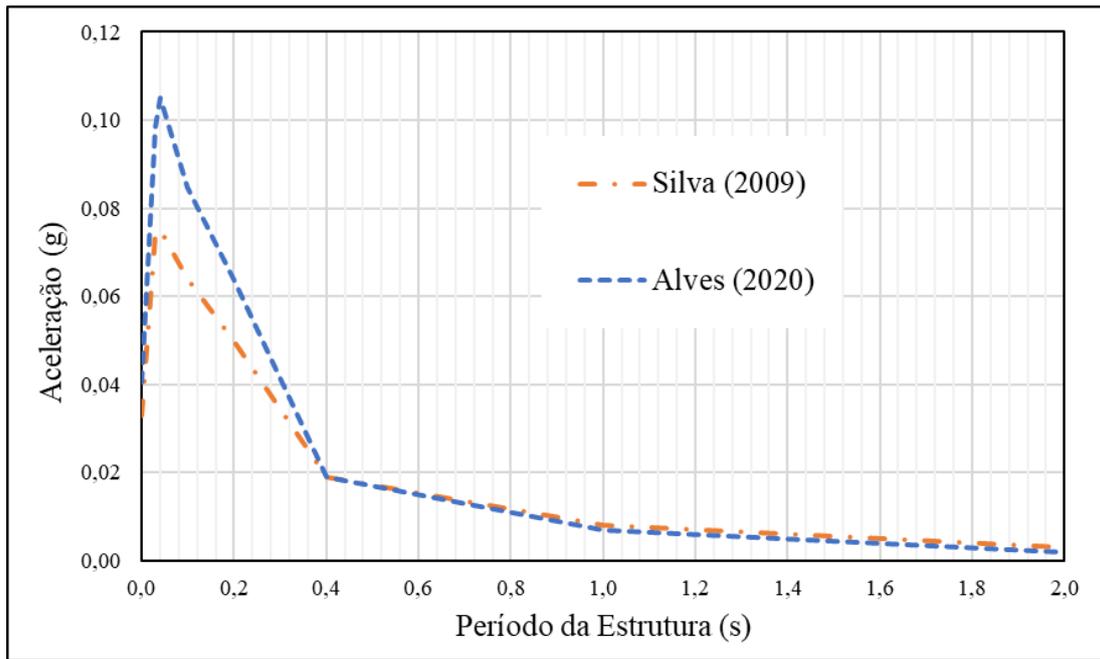


Figura 5-2 - Comparação dos EAU da Região Nordeste, SILVA (2009), T=475 anos.

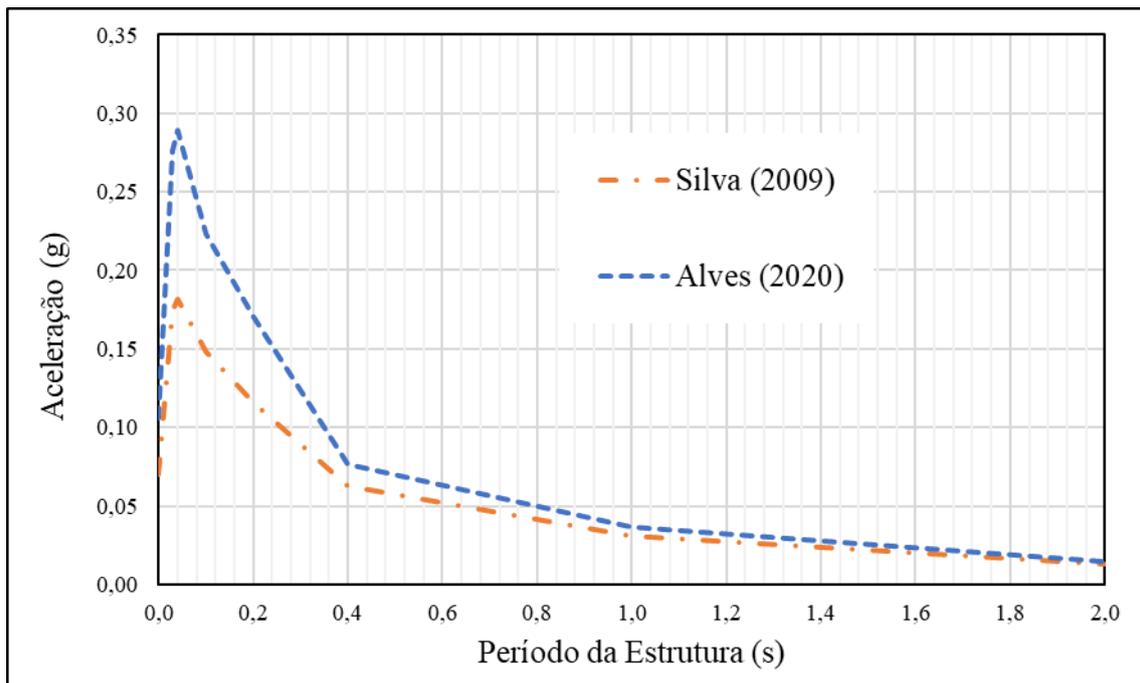


Figura 5-3 – Comparação dos EAU da Região Nordeste, SILVA (2009), T=2475 anos.

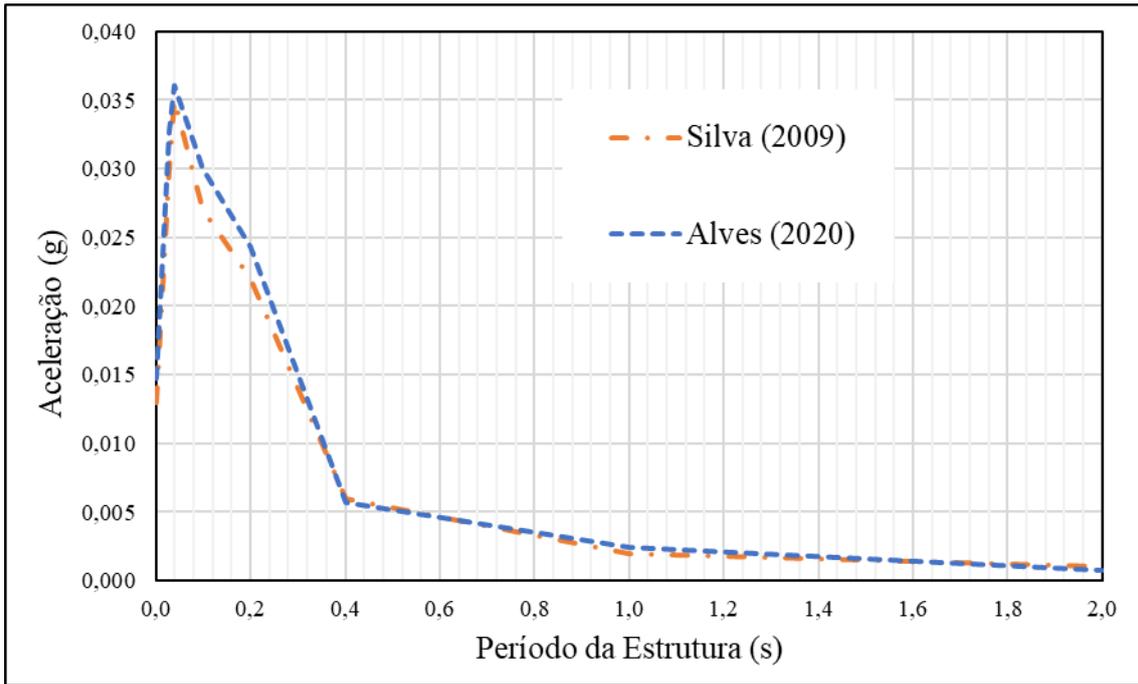


Figura 5-4 – Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2009), T=475 anos.

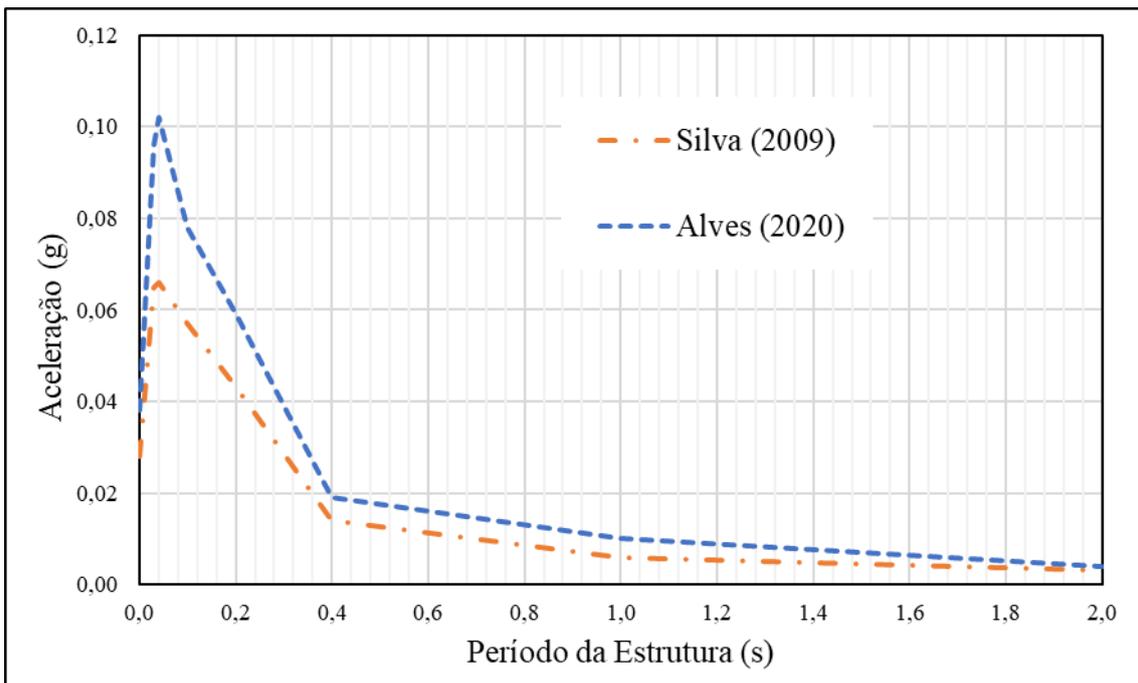


Figura 5-5 – Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2009), T=2475 anos.

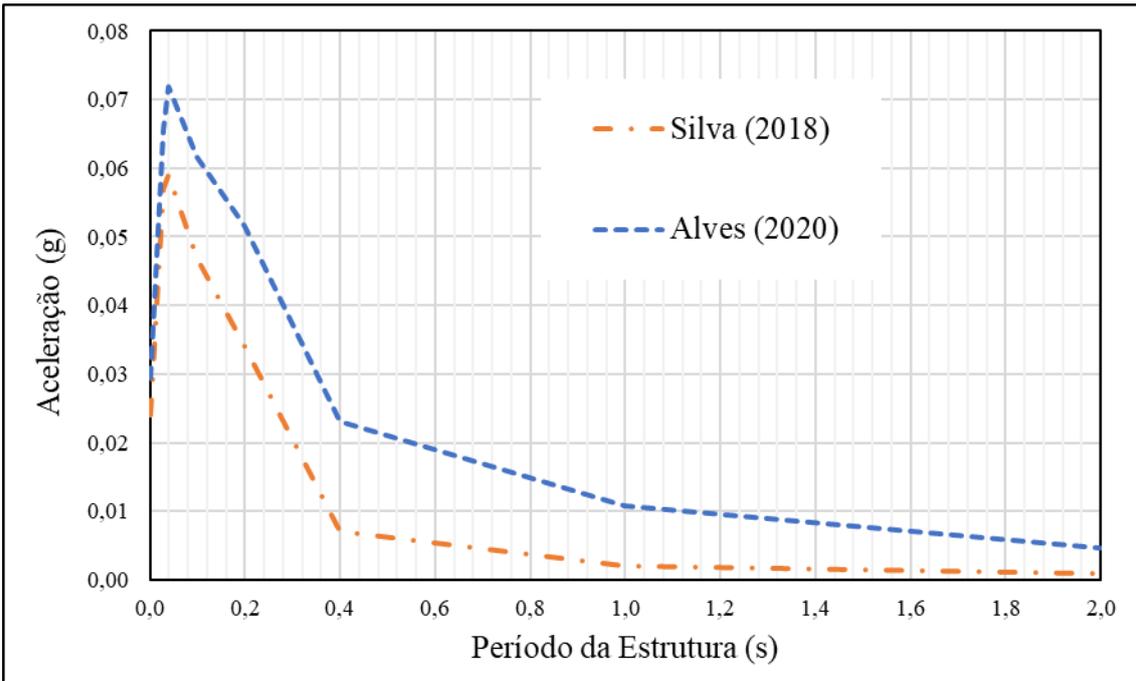


Figura 5-6 - Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2018), T=475 anos.

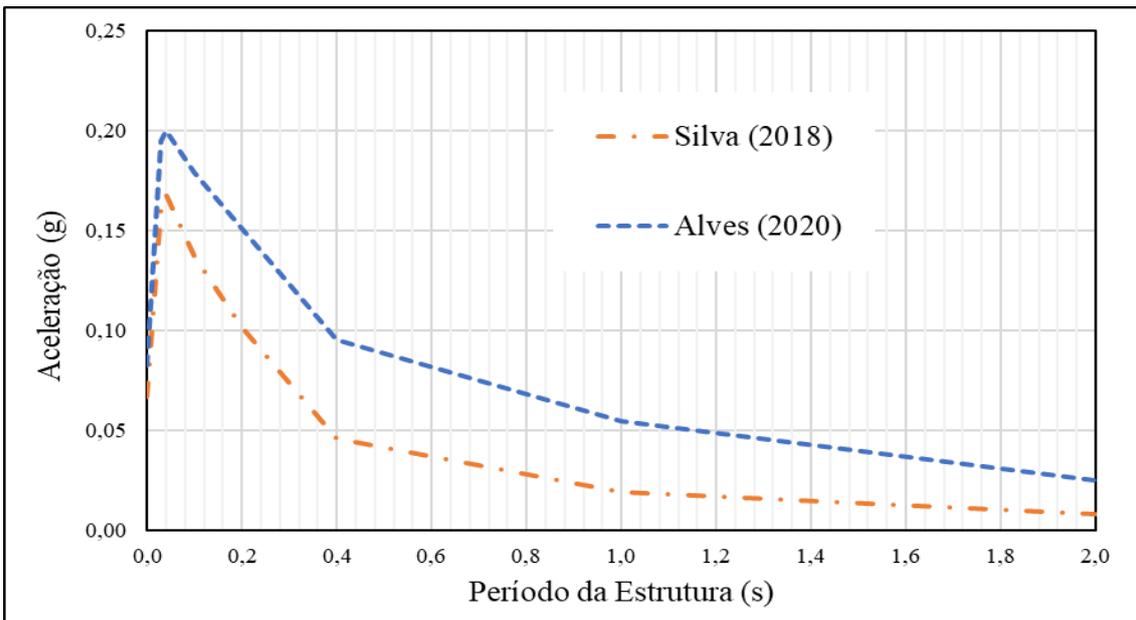


Figura 5-7 - Comparação dos EAU da Região Sudeste, SILVA (2018), T=2475 anos.

Tabela 5-10 – Acelerações espectrais comparadas da Região Nordeste, SILVA (2009),

T=475 anos.

Frequência da Estrutura (Hz)	Período da Estrutura (s)	Aceleração SILVA (2009) (g)	Aceleração ALVES (2020) (g)	Diferença (g)	Diferença %
PGA	0,00	0,033	0,041	0,008	23%
35,0	0,0286	0,074	0,098	0,024	33%
25,0	0,04	0,075	0,105	0,030	40%
10,0	0,10	0,064	0,085	0,021	32%
5,0	0,20	0,050	0,064	0,014	28%
2,5	0,40	0,019	0,019	0,000	-1%
1,0	1,00	0,008	0,007	-0,001	-12%
0,5	2,00	0,003	0,002	-0,001	-32%

Tabela 5-11 – Acelerações espectrais comparadas da Região Nordeste, SILVA (2009),

T=2475 anos.

Frequência da Estrutura (Hz)	Período da Estrutura (s)	Aceleração SILVA (2009) (g)	Aceleração ALVES (2020) (g)	Diferença (g)	Diferença %
PGA	0,00	0,070	0,106	0,036	51%
35,0	0,0286	0,174	0,276	0,102	59%
25,0	0,04	0,182	0,289	0,107	59%
10,0	0,10	0,148	0,223	0,075	51%
5,0	0,20	0,116	0,170	0,054	47%
2,5	0,40	0,063	0,077	0,014	22%
1,0	1,00	0,031	0,037	0,006	19%
0,5	2,00	0,013	0,014	0,001	11%

Tabela 5-12 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2009),

T=475 anos.

Frequência da Estrutura (Hz)	Período da Estrutura (s)	Aceleração SILVA (2009) (g)	Aceleração ALVES (2020) (g)	Diferença (g)	Diferença %
PGA	0,00	0,013	0,015	0,002	13%
35,0	0,0286	0,030	0,033	0,003	9%
25,0	0,04	0,035	0,036	0,001	3%
10,0	0,10	0,027	0,030	0,003	11%
5,0	0,20	0,022	0,024	0,002	10%
2,5	0,40	0,006	0,006	0,000	-5%
1,0	1,00	0,002	0,002	0,000	20%
0,5	2,00	0,001	0,001	0,000	-29%

Tabela 5-13 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2009),

T=2475 anos

Frequência da Estrutura (Hz)	Período da Estrutura (s)	Aceleração SILVA (2009) (g)	Aceleração ALVES (2020) (g)	Diferença (g)	Diferença %
PGA	0,00	0,028	0,038	0,010	36%
35,0	0,0286	0,065	0,096	0,031	48%
25,0	0,04	0,066	0,102	0,036	55%
10,0	0,10	0,057	0,078	0,021	37%
5,0	0,20	0,043	0,059	0,016	37%
2,5	0,40	0,014	0,019	0,005	35%
1,0	1,00	0,006	0,010	0,004	66%
0,5	2,00	0,003	0,004	0,001	32%

Tabela 5-14 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2018),

T=475 anos.

Frequência da Estrutura (Hz)	Período da Estrutura (s)	Aceleração Silva (2009) (g)	Aceleração ALVES (2020) (g)	Diferença (g)	Diferença %
PGA	0,00	0,024	0,029	0,005	23%
35,0	0,0286	0,057	0,066	0,009	15%
25,0	0,04	0,059	0,072	0,013	22%
10,0	0,10	0,047	0,062	0,015	31%
5,0	0,20	0,034	0,052	0,018	52%
2,5	0,40	0,007	0,023	0,016	229%
1,0	1,00	0,002	0,011	0,009	435%
0,5	2,00	0,001	0,005	0,004	366%

Tabela 5-15 – Acelerações espectrais comparadas da Região Sudeste, SILVA (2018),

T=2475 anos.

Frequência da Estrutura (Hz)	Período da Estrutura (s)	Aceleração Silva (2009) (g)	Aceleração ALVES (2020) (g)	Diferença (g)	Diferença %
PGA	0,00	0,067	0,083	0,016	24%
35,0	0,0286	0,161	0,195	0,034	21%
25,0	0,04	0,168	0,200	0,032	19%
10,0	0,10	0,137	0,179	0,042	31%
5,0	0,20	0,102	0,151	0,049	48%
2,5	0,40	0,046	0,095	0,049	107%
1,0	1,00	0,019	0,055	0,036	188%
0,5	2,00	0,008	0,025	0,017	213%

## 5.5. Discussão sobre os resultados

Como pode ser observado nas Figuras 5-2 e 5-3 os valores das acelerações espectrais obtidos na Região Nordeste de SILVA (2009), para 475 e 2475 anos, diferem dos valores encontrados no trabalho original da autora na região de baixos períodos e concordam bem, principalmente a partir de  $T=0,4$  s.

As diferenças de valores dos resultados de SILVA (2009) são justificadas, principalmente, pela contabilização de incertezas (aleatórias e epistêmicas) em todo o cálculo feito pelo R-CRISIS. As incertezas embutidas nos GMPM tendem a gerar maiores valores de aceleração próximo ao local estudado, uma vez que os dados de terremotos próximos, que ajudam a compor o GMPM, são mais raros (TORO *et al.*, 1997). Sendo assim, como estes sismos mais próximos contribuem mais para as acelerações em baixos períodos, como mostram as Figura 5-8 (a) e (b), as acelerações espectrais nestes mesmos períodos são mais altas.

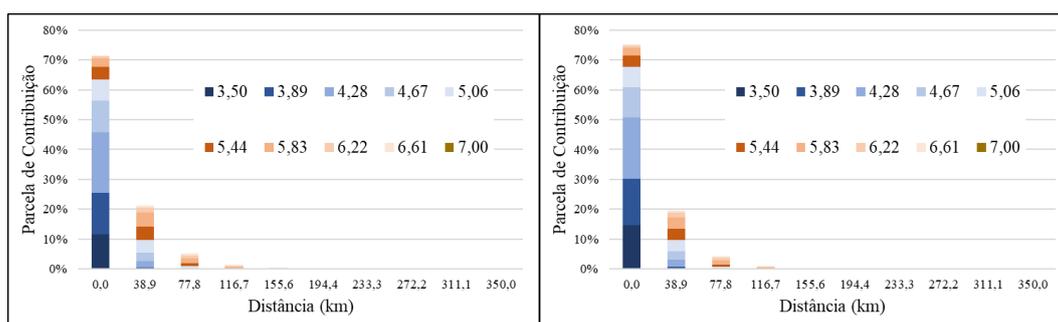


Figura 5-8 – Gráficos de desagregação para o (a) PGA e (b)  $T=0,04$  s na região Nordeste de SILVA (2009).

O resultado da região Sudeste de SILVA (2009) para 475 anos, mostrado na Figura 5-4, apresenta valores quase coincidentes com os originais, diferenciando-se dos demais. Isto ocorre, pois o efeito explicado acima é atenuado pela baixa sismicidade do local, ou seja, apesar da presença de terremotos próximos, sua frequência anual é muito baixa e não contribuem efetivamente no aumento dos valores de aceleração espectral. Entretanto, isso não se repete no resultado para 2475 anos, mostrado na Figura 5-5, quando a incerteza temporal contribui para que os valores aumentem um pouco.

Os resultados obtidos a partir do trabalho de SILVA (2018), mostrados nas Figuras 5-6 e 5-7, são maiores em todos os períodos, numa média de 0,010 g para 475 anos e

0,035 g para 2475 anos. Esta diferença se distribui de forma quase constante ao longo dos espectros, com valores pequenos no começo e no final e com seu máximo próximo a  $T=0,4$  s.

Provavelmente, o uso de um desvio padrão médio único para todos os períodos, incorreu nas diferenças encontrada entre os valores. TORO *et al.* (1997) utilizam incertezas (contabilizadas como desvios padrões) variáveis que dependem da frequência, da magnitude e da distância, com um valor médio bem acima dos adotados por SILVA (2018).

## 6. ESTUDOS DE VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROGRAMA R-CRISIS

---

Como foi visto no Capítulo 4, existem vários parâmetros a serem escolhidos na análise a ser feita pelo R-CRISIS. Assim, neste capítulo será estudada a influência de alguns importantes parâmetros no processamento, a fim de basear a escolha dos seus valores na análise subsequente deste trabalho. A escolha desses parâmetros foi feita de maneira a não coincidir com aqueles estudados por SOUZA (2019), tornando os dois trabalhos complementares neste aspecto.

### 6.1. Estudo de variação da distância máxima de integração

A Distância Máxima de Integração define o limite superior da integral segundo a distância, apresentada na Equação 3-10 e, fisicamente, se relaciona com a área de influência de um terremoto. Terremotos de menores magnitudes tem uma menor área de influência e vice-versa, isto é, a partir de uma determinada distância (raio desta área de influência) este terremoto não gera acelerações horizontais relevantes.

Foi estudada a influência deste parâmetro em três diferentes configurações: as áreas Sudeste e Nordeste de SILVA (2009), com uma área-fonte cada, e a área Sudeste de SILVA (2018), composta de duas áreas-fontes. A primeira é uma área-fonte de baixa sismicidade, a segunda de média sismicidade e a terceira uma composição de uma de baixa com uma de média sismicidade.

As Tabelas 6-1, 6-2 e 6-3 mostram as acelerações calculadas para três períodos diferentes e para sete diferentes valores de Distância Máxima de Integração, nas três configurações de sismicidade citadas, respectivamente. Os períodos foram escolhidos seguindo os períodos de referência da ASCE (2016).

Tabela 6-1 – Acelerações em  $g$  para diferentes Distâncias Máximas de Integração e períodos estruturais da Região Nordeste, SILVA (2009)

Distância (km)	200	250	300	350	400	450	500
<b>PGA</b>	0,0392	0,0393	0,0393	0,0393	0,0393	0,0393	0,0393
<b>0,2 s</b>	0,0617	0,0619	0,0619	0,0619	0,0619	0,0619	0,0620
<b>1,0 s</b>	0,0062	0,0067	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068

Tabela 6-2 - Acelerações em  $g$  para diferentes Distâncias Máximas de Integração e períodos estruturais da Região Sudeste, SILVA (2009)

Distância (km)	200	250	300	350	400	450	500
<b>PGA</b>	0,0139	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140	0,0140
<b>0,2 s</b>	0,0226	0,0229	0,0230	0,0231	0,0232	0,0232	0,0232
<b>1,0 s</b>	0,0012	0,0016	0,0019	0,0022	0,0024	0,0026	0,0027

Tabela 6-3 - Acelerações em  $g$  para diferentes Distâncias Máximas de Integração e períodos estruturais da Região Sudeste, SILVA (2018)

Distância (km)	200	250	300	350	400	450	500
<b>PGA</b>	0,0293	0,0299	0,0301	0,0301	0,0302	0,0302	0,0302
<b>0,2 s</b>	0,0514	0,0538	0,0549	0,0551	0,0553	0,0553	0,0553
<b>1,0 s</b>	0,0107	0,0145	0,0171	0,0182	0,0190	0,0197	0,0201

Observa-se nas tabelas acima que o parâmetro influencia principalmente as acelerações nos altos períodos (baixas frequências), onde existe uma maior diferença entre as distâncias extremas. Para o PGA e para os baixos períodos, as acelerações mantêm a mesma ordem de grandeza.

## 6.2. Estudo de variação do *Sigma Truncation*

O parâmetro *Sigma Truncation* existe para evitar um trabalho computacional desnecessário, isto é, pode-se configurar um limite (truncamento) para o cálculo da integral da função de atenuação, ao invés de fazê-lo considerando o infinito como limite. Este limite pode ser considerado em termos da quantidade de desvios padrões ( $\sigma$ ) ou em termos de valores inseridos pelo analista. Neste estudo, serão comparados somente diferentes valores de desvios padrões e seus respectivos tempos de processamento.

De maneira semelhante ao estudo anterior, foi estudada a influência deste parâmetro nas mesmas três configurações de sismicidade citadas, assim como nos mesmos períodos. As Tabelas 6-4, 6-5 e 6-6 mostram os valores de aceleração horizontal encontrados, assim como, os respectivos tempos de processamento em segundos. O valor zero de desvios padrões indica a opção sem truncamento, segundo padrão descrito por ORDAZ E SALGADO-GÁLVEZ (2019).

Os tempos de processamento, neste estudo e nos que se seguem, foram tomados como a média do tempo em segundos de vinte processamentos, para que pequenas diferenças de origem aleatória fossem minimizadas.

Tabela 6-4- Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes números de desvios padrões e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Número de desvios padrões</b>	<b>0,0</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>
<b>PGA</b>	0,039	0,028	0,030	0,033	0,036	0,038	0,039
<b>0,2 s</b>	0,062	0,043	0,047	0,052	0,056	0,060	0,061
<b>1,0 s</b>	0,007	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007	0,007
<b>tempo (s)</b>	1,47	1,34	1,36	1,39	1,42	1,42	1,44

Tabela 6-5 - Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes números de desvios padrões e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2009)

<b>Número de desvios padrões</b>	<b>0,0</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>
<b>PGA</b>	0,014	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,014
<b>0,2 s</b>	0,023	0,016	0,018	0,019	0,021	0,022	0,023
<b>1,0 s</b>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
<b>tempo (s)</b>	2,08	1,90	1,92	1,95	1,96	1,98	2,01

Tabela 6-6 – Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes números de desvios padrões e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2018)

<b>Número de desvios padrões</b>	<b>0,0</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>
<b>PGA</b>	0,030	0,021	0,023	0,025	0,028	0,029	0,030
<b>0,2 s</b>	0,055	0,038	0,042	0,046	0,050	0,053	0,054
<b>1,0 s</b>	0,017	0,012	0,013	0,015	0,016	0,017	0,017
<b>tempo (s)</b>	9,16	8,18	8,33	8,39	8,52	8,58	8,79

As Tabelas 6-7, 6-8 e 6-9 mostram o comparativo percentual tomando como base o processamento sem truncamento. Os percentuais são calculados segundo as Equações (6-1) e (6-2) e podem ser entendidos, respectivamente, como o erro percentual para cada valor e o ganho percentual de tempo em cada processamento.

$$Erro \% = \frac{a_i - a_0}{a_0} \times 100 \quad (6-1)$$

$$Ganho \% = \frac{t_i - t_0}{t_0} \times 100 \quad (6-2)$$

Tabela 6-7 - Percentagens em relação ao valor sem truncamento da Região Nordeste de SILVA (2009)

Número de desvios padrões	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<b>PGA</b>	29,8%	23,4%	15,8%	8,7%	3,8%	1,3%
<b>0,2 s</b>	30,5%	24,1%	16,2%	8,9%	3,9%	1,3%
<b>1,0 s</b>	19,7%	15,4%	10,2%	5,3%	2,4%	0,7%
<b>tempo (s)</b>	8,7%	7,9%	5,9%	3,4%	3,7%	2,2%

Tabela 6-8 – Percentagens em relação ao valor sem truncamento da Região Sudeste de SILVA (2009)

Número de desvios padrões	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<b>PGA</b>	26,4%	21,4%	14,3%	7,9%	3,6%	1,4%
<b>0,2 s</b>	28,7%	23,0%	15,7%	8,7%	3,9%	1,3%
<b>1,0 s</b>	8,1%	1,1%	2,7%	1,6%	1,1%	0,5%
<b>tempo (s)</b>	8,3%	7,6%	6,2%	5,8%	4,8%	3,1%

Tabela 6-9 – Percentagens em relação ao valor sem truncamento da Região Sudeste de SILVA (2018)

Número de desvios padrões	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<b>PGA</b>	29,9%	23,9%	15,9%	8,6%	3,7%	1,3%
<b>0,2 s</b>	30,4%	24,4%	16,4%	8,9%	3,8%	1,3%
<b>1,0 s</b>	27,5%	21,6%	13,5%	7,0%	2,3%	0,6%
<b>tempo (s)</b>	10,7%	9,0%	8,3%	6,9%	6,2%	3,9%

Observa-se nas Tabelas 6-7, 6-8 e 6-9 que os erros atrelados ao truncamento permanecem acima de 1%, mesmo próximo de três desvios padrões, sem um ganho de tempo considerável. Tal informação pode ser útil em processamentos maiores onde o ganho de tempo possa ser relevante em termos absolutos e/ou erros percentuais maiores possam ser aceitáveis.

### 6.3. Estudo de variação do número de magnitudes

O número de magnitudes define o nível de discretização da relação Gutenberg-Richter apresentada na Equação 3-5 e, conseqüentemente, na quantidade de fatores somados na integral numérica representada pela Equação 3-10. As Figuras 6-1 (a) a (e) mostram a diferença no gráfico para as cinco quantidades escolhidas para este estudo.

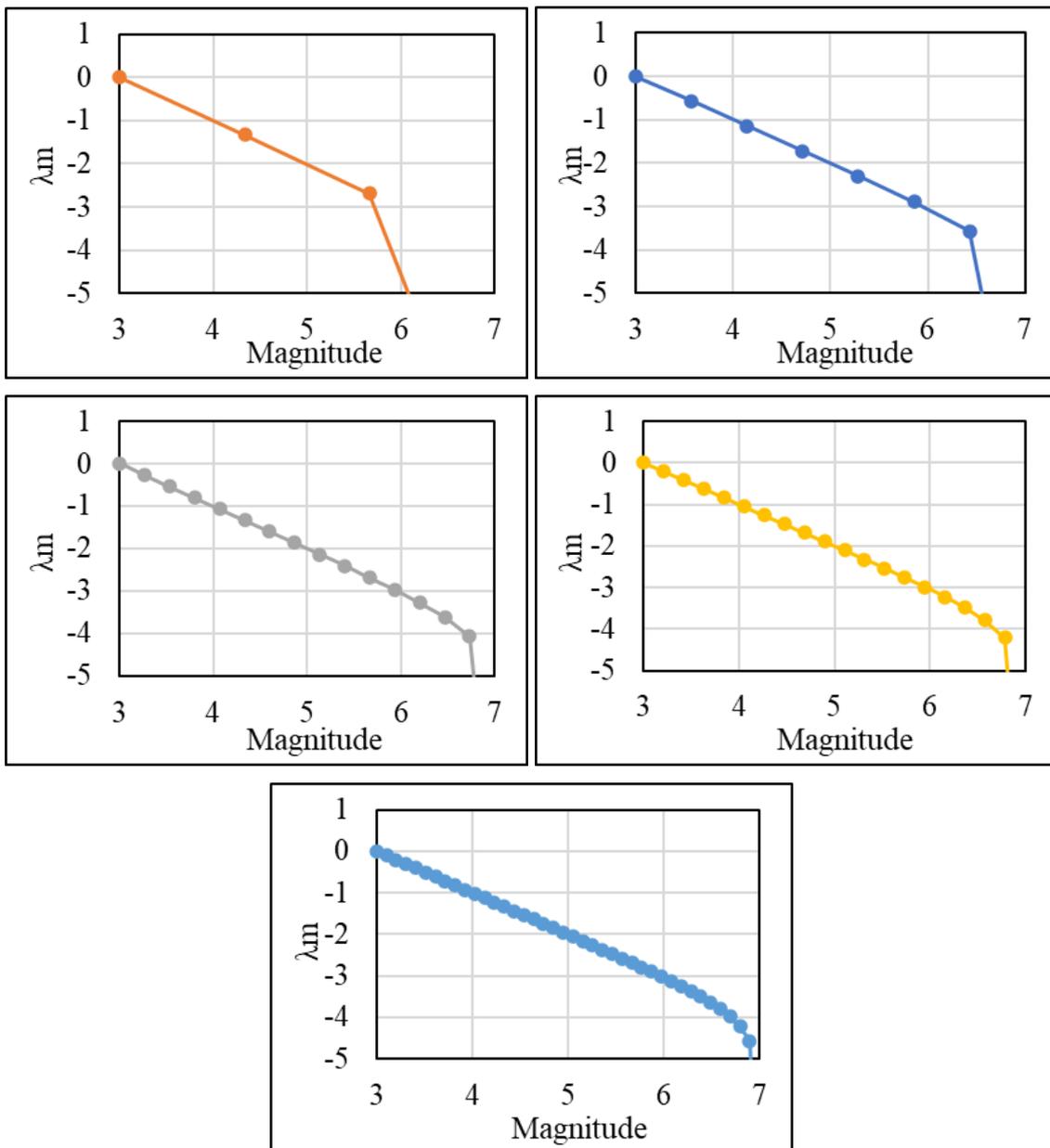


Figura 6-1 - Relação de Gutemberg-Richter truncada, em escala semi-log, discretizada com diferentes números de magnitudes: (a) 4; (b) 8; (c) 16; (d) 20; (e) 40.

A influência deste parâmetro nos resultados da análise foi estudada nas mesmas três configurações de sismicidade e nos três períodos apresentados nos itens anteriores. As Tabelas 6-10, 6-11 e 6-12 mostram como o valor da aceleração horizontal varia para cada caso, assim como o respectivo tempo de processamento. O programa adota como valor padrão nove magnitudes.

Tabela 6-10 – Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes números de magnitude e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Número de Magnitudes</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>40</b>
<b>PGA</b>	0,0436	0,0402	0,0396	0,0394	0,0393	0,0391
<b>0,2 s</b>	0,0687	0,0634	0,0625	0,0621	0,0619	0,0617
<b>1,0 s</b>	0,0081	0,0070	0,0068	0,0068	0,0068	0,0067
<b>tempo (s)</b>	0,42	0,73	0,95	1,22	1,42	2,74

Tabela 6-11 – Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes números de magnitude e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2009)

<b>Número de Magnitudes</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>40</b>
<b>PGA</b>	0,0162	0,0145	0,0142	0,0141	0,0140	0,0139
<b>0,2 s</b>	0,0266	0,0238	0,0233	0,0231	0,0230	0,0229
<b>1,0 s</b>	0,0023	0,0019	0,0019	0,0019	0,0018	0,0018
<b>tempo (s)</b>	0,53	0,98	1,23	1,78	2,02	4,08

Tabela 6-12 - Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes números de magnitude e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2018)

<b>Número de Magnitudes</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>40</b>
<b>PGA</b>	0,0324	0,0306	0,0303	0,0302	0,0301	0,0300
<b>0,2 s</b>	0,0591	0,0558	0,0552	0,0551	0,0549	0,0548
<b>1,0 s</b>	0,0188	0,0175	0,0173	0,0172	0,0171	0,0170
<b>tempo (s)</b>	2,16	4,06	6,14	8,06	9,45	19,81

As Tabelas 6-13, 6-14 e 6-15 mostram o comparativo percentual tomando como base o processamento com quarenta magnitudes, pois adotou-se a premissa de que quanto mais discretizada a função, mais exatos serão os seus valores. Os percentuais são calculados, da mesma forma que nos estudos anteriores, baseando-se nas Equações (6-1) e (6-2).

Tabela 6-13 – Percentuais em relação aos valores para 40 magnitudes da Região Nordeste de SILVA (2009)

Número de Magnitudes	4	8	12	16	20
<b>PGA</b>	11,5%	2,8%	1,3%	0,8%	0,5%
<b>0,2 s</b>	11,3%	2,8%	1,3%	0,6%	0,3%
<b>1,0 s</b>	20,6%	4,0%	1,6%	1,5%	0,9%
<b>tempo (s)</b>	84,7%	73,4%	65,3%	55,5%	48,2%

Tabela 6-14 - Percentuais em relação aos valores para 40 magnitudes da Região Sudeste de SILVA (2009)

Número de Magnitudes	4	8	12	16	20
<b>PGA</b>	16,5%	4,3%	2,2%	1,4%	0,7%
<b>0,2 s</b>	16,2%	3,9%	1,7%	0,9%	0,4%
<b>1,0 s</b>	28,2%	3,3%	3,3%	2,2%	1,7%
<b>tempo (s)</b>	87,0%	76,0%	69,9%	56,4%	50,5%

Tabela 6-15 - Percentuais em relação aos valores para 40 magnitudes da Região Sudeste de SILVA (2018)

Número de Magnitudes	4	8	12	16	20
<b>PGA</b>	8,0%	2,0%	1,0%	0,7%	0,3%
<b>0,2 s</b>	7,8%	1,8%	0,7%	0,5%	0,2%
<b>1,0 s</b>	10,6%	2,9%	1,8%	1,2%	0,6%
<b>tempo (s)</b>	89,1%	79,5%	69,0%	59,3%	52,3%

Podemos observar nas Tabelas 6-13, 6-14 e 6-15 que a variação deste parâmetro atinge a todos os períodos de maneira semelhante e que o ganho de tempo varia quase que linearmente. O erro percentual começa a se aproximar de 0,1% em todos os períodos, de 16 magnitudes em diante.

#### 6.4. Estudo de variação da discretização da malha de cálculo

A discretização da malha de cálculo é controlada por um par de parâmetros: *Minimum triangle size* e *Minimum Distance/Triangle Size ratio*. Segundo ORDAZ E SALGADO-GÁLVEZ (2019), quanto menor o primeiro e maior o segundo a malha torna-se mais discreta junto ao ponto de interesse. Este efeito pode ser observado nas Figuras 6-2 (a), (b) e (c).

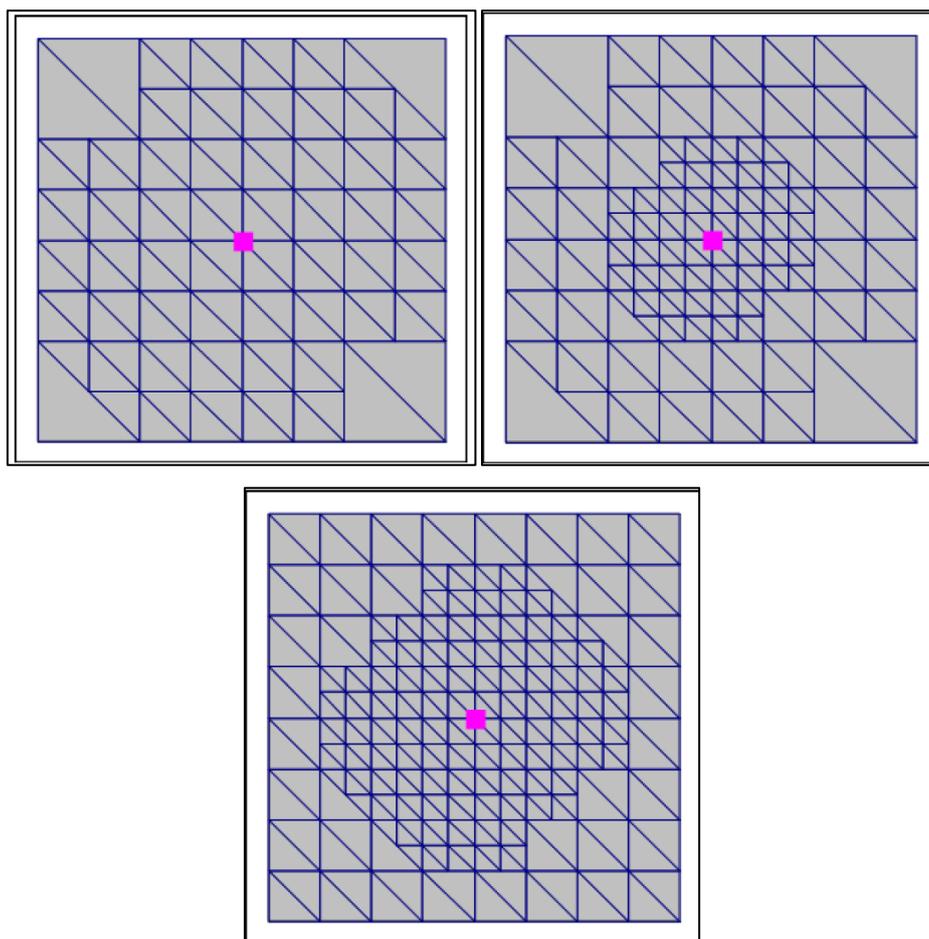


Figura 6-2 - Malha de cálculo para diferentes pares de parâmetros de discretização:  
 (a) 11:3; (b) 5:3; (c) 5:4. Fonte: ORDAZ E SALGADO-GÁLVEZ (2019).

Neste estudo investigou-se a influência dos dois parâmetros citados nos valores de aceleração horizontal no PGA, utilizando-se somente a área-fonte do Nordeste de SILVA (2009) como base. Os valores padrões do programa para os dois parâmetros são 11 para o primeiro e 3 para o segundo. A Tabela 6-16 mostra os valores de aceleração horizontal encontrados e a Tabela 6-17 os respectivos tempos de processamento em segundos.

As Tabelas 6-18 e 6-19 mostram o comparativo percentual tomando o valor de aceleração e de tempo de processamento relativo ao par de parâmetros 0,5:9. Adotou-se a premissa de que quanto mais discretizada a malha de cálculo, mais exato será o valor encontrado e, portanto, este valor foi tomado como referência de comparação.

Tabela 6-16 – Acelerações em g para diferentes valores de *Minimum triangle size* e *Minimum distance / triangle size ratio*

Aceleração (g)		<i>Minimum triangle size</i>							
		0,5	1	3	5	7	9	11	13
<i>Minimum distance / triangle size ratio</i>	1	0,0268	0,0268	0,0268	0,0268	0,0268	0,0268	0,0274	0,0274
	3	0,0297	0,0297	0,0297	0,0299	0,0299	0,0299	0,0304	0,0304
	5	0,0300	0,0300	0,0300	0,0301	0,0301	0,0301	0,0304	0,0304
	7	0,0300	0,0300	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0304	0,0304
	9	0,0300	0,0300	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0304	0,0304

Tabela 6-17 – Tempos de processamento em segundos para diferentes valores de *Minimum triangle size* e *Minimum distance / triangle size ratio*

Tempo (s)		<i>Minimum triangle size</i>							
		0,5	1	3	5	7	9	11	13
<i>Minimum distance / triangle size ratio</i>	1	0,57	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	3	1,00	1,00	0,99	0,87	0,87	0,87	0,71	0,70
	5	2,06	2,06	1,82	1,45	1,43	1,43	1,08	0,96
	7	3,77	3,77	2,92	2,17	2,03	2,03	1,39	1,09
	9	5,95	5,95	3,98	2,84	2,53	2,53	1,69	1,21

Tabela 6-18 - Percentagens em relação à aceleração para o par 0,5:9.

Erro %		<i>Minimum triangle size</i>							
		0,5	1	3	5	7	9	11	13
<i>Minimum distance / triangle size ratio</i>	1	-10,8%	-10,8%	-10,8%	-10,8%	-10,8%	-10,8%	-8,8%	-8,8%
	3	-1,1%	-1,1%	-1,1%	-0,5%	-0,5%	-0,5%	1,0%	1,0%
	5	-0,3%	-0,3%	-0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	1,3%	1,3%
	7	-0,1%	-0,1%	0,0%	0,2%	0,1%	0,1%	1,3%	1,3%
	9	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	1,3%	1,3%

Tabela 6-19 - Percentagens em relação ao tempo de processamento para o par 0,5:9.

Ganho %		<i>Minimum triangle size</i>							
		0,5	1	3	5	7	9	11	13
<i>Minimum distance / triangle size ratio</i>	1	-90%	-91%	-91%	-91%	-91%	-91%	-91%	-91%
	3	-83%	-83%	-83%	-85%	-85%	-85%	-88%	-88%
	5	-65%	-65%	-69%	-76%	-76%	-76%	-82%	-84%
	7	-37%	-37%	-51%	-64%	-66%	-66%	-77%	-82%
	9	0%	0%	-33%	-52%	-57%	-57%	-72%	-80%

Observa-se pelas Tabelas 6-18 e 6-19 que o erro percentual da aceleração e o ganho percentual do tempo de processamento dependem mais do valor de *Minimum distance / triangle size ratio* e que as acelerações variam muito pouco dentro dos valores de 5 a 9 do *Minimum distance / triangle size ratio* e de 0,5 a 9 do *Minimum triangle size*. O ganho percentual em tempo de processamento, por sua vez, apresenta diferenças significativas com a mudança de ambos os parâmetros.

Uma vez que o erro percentual e o ganho percentual funcionam de maneira antagônica, ou seja, deve-se escolher um em detrimento do outro. Podemos definir uma medida que ajude a analisar de maneira conjunta se a discretização é vantajosa ou não. Essa medida pode ser calculada como a razão expressa na Equação 6-3; quanto menor for o seu valor, melhor a relação entre essas grandezas. A Tabela 6-20 resume os valores desta medida encontrada para os pares de parâmetros estudados.

$$Razão \% = Erro \% / Ganho \% \quad (6-3)$$

Tabela 6-20 - Razão entre erro percentual da aceleração e ganho percentual de tempo, com a relação ótima destacada.

Razão %		Minimum triangle size							
		0,5	1	3	5	7	9	11	13
Minimum distance / triangle size ratio	1	0,119	0,119	0,119	0,119	0,119	0,119	0,097	0,097
	3	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006	0,012	0,012
	5	0,005	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,015	0,015
	7	0,003	0,003	0,001	0,003	0,002	0,002	0,017	0,015
	9	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	0,019	0,016

Por fim, observa-se na Tabela 6-20 que o par 5:5, dentro do domínio de parâmetros investigado, apresenta a relação ótima entre os dois. Apesar de haver outros pares com o mesmo desempenho, este par é o que apresenta a melhor relação do menor tempo com a maior discretização possível.

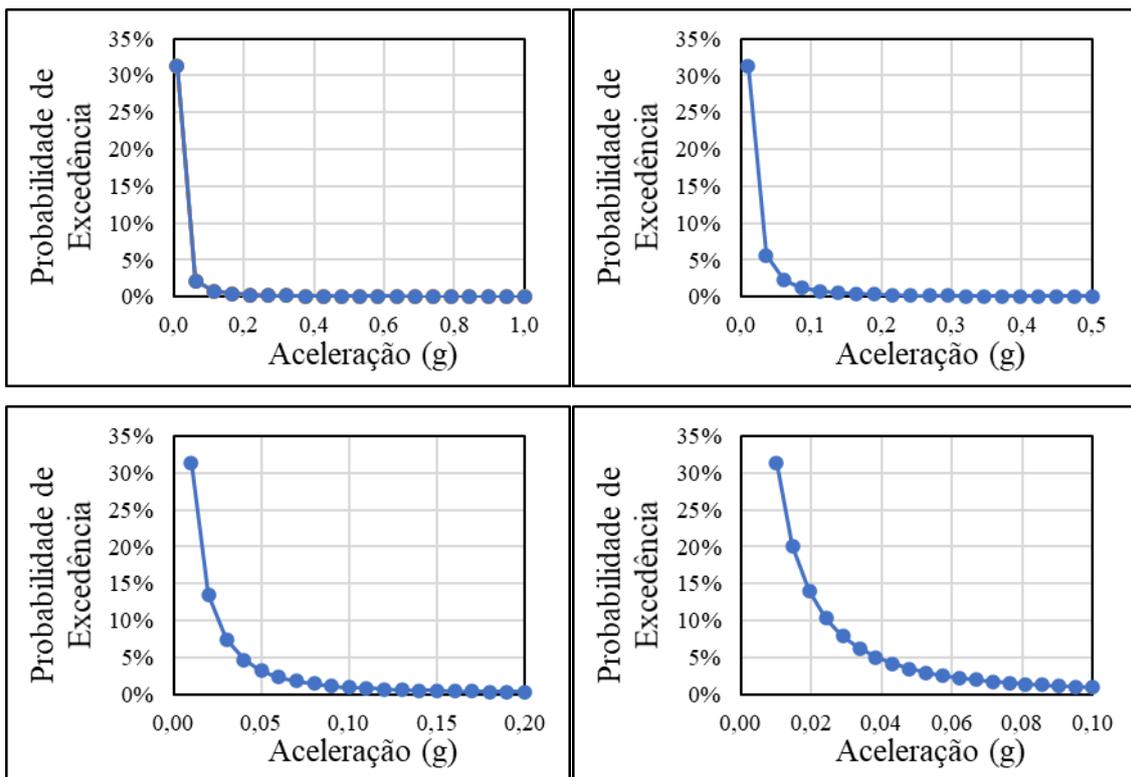
### 6.5. Estudo de variação da faixa de aceleração espectral

A faixa de aceleração espectral determina os valores de aceleração espectral para os quais serão calculadas as probabilidades de excedência, isto é, determina os limites para o traçado da Curva de Ameaça Sísmica. Além disso, é possível determinar em quantas partes e de que maneira esta faixa pode ser dividida.

Os limites são determinados por dois parâmetros, *lower limit of intensity level* (limite inferior) e *upper limit of intensity level* (limite superior), e a discretização por outros dois, *number of levels of intensity* (número de acelerações) e *spacing* (espaçamento). Quanto mais discreta é a Curva de Ameaça Sísmica, mais exato é o valor das acelerações que compõem o Espectro de Ameaça Uniforme.

Neste estudo investigou-se a influência destes parâmetros citados nos valores de aceleração horizontal em quatro períodos diferentes e nas três configurações de sismicidade citadas anteriormente neste capítulo.

As Figuras 6-3 (a) a (f) mostram exemplos das sete diferentes discretizações lineares das Curvas de Ameaça Sísmica estudadas e, em seguida, as Tabelas 6-21, 6-22 e 6-23 mostram os valores de aceleração e os tempos de processamento encontrados para as respectivas sete combinações de parâmetros diferentes que são identificadas pelos sete tamanhos diferentes de divisão linear da curva.



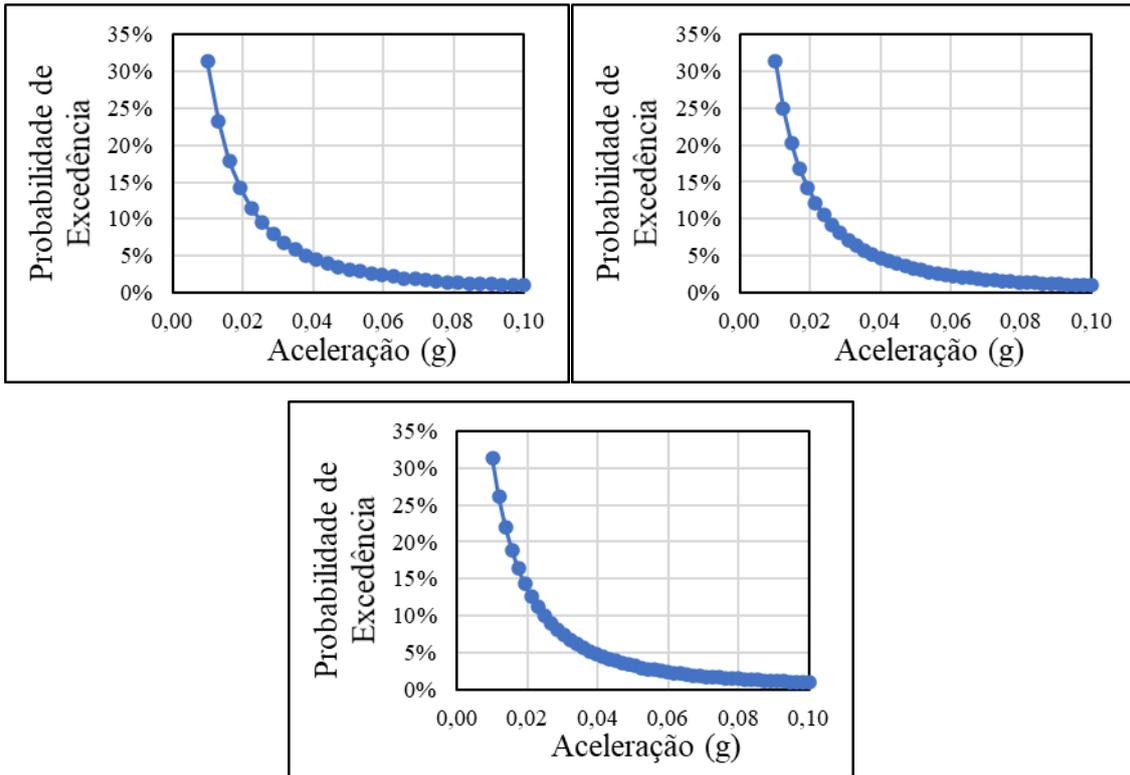


Figura 6-3 – Exemplos de Curvas de Ameaça Sísmica discretizadas linearmente com sete tamanhos de divisão diferentes: (a) 0,050; (b) 0,025; (c) 0,010; (d) 0,005; (e) 0,003; (f) 0,0023; (g) 0,0018.

Tabela 6-21 - Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões lineares e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Limite Inferior (g)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de acelerações</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>Tamanho da divisão (g)</b>	<b>0,050</b>	<b>0,025</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,003</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,0018</b>
<b>PGA</b>	0,0269	0,0292	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301
<b>0,05 s</b>	0,0669	0,0670	0,0672	0,0672	0,0672	0,0672	0,0672
<b>0,2 s</b>	0,0389	0,0421	0,0424	0,0425	0,0425	0,0425	0,0425
<b>1,0 s</b>	0,0057	0,0055	0,0053	0,0052	0,0051	0,0051	0,0051
<b>1,0 s ajustado</b>	0,0045	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047
<b>Tempo (s)</b>	1,08	1,09	1,09	1,09	1,24	1,41	1,56

Tabela 6-22 - Acelerações em *g* e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões lineares e períodos estruturais da região

Sudeste de SILVA (2009)

<b>Limite Inferior (g)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de acelerações</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>Tamanho da divisão (g)</b>	<b>0,050</b>	<b>0,025</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,003</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,0018</b>
<b>PGA</b>	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096
<b>0,05 s</b>	0,0211	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212
<b>0,2 s</b>	0,0148	0,0150	0,0152	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153
<b>1,0 s</b>	0,0026	0,0024	0,0022	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
<b>1,0 s ajustado</b>	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0014
<b>Tempo (s)</b>	1,57	1,57	1,58	1,60	1,83	2,06	2,30

Tabela 6-23 - Acelerações em *g* e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões lineares e períodos estruturais da região

Sudeste de SILVA (2018)

<b>Limite Inferior (g)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de acelerações</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>Tamanho da divisão (g)</b>	<b>0,050</b>	<b>0,025</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,003</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,0018</b>
<b>PGA</b>	0,0219	0,0233	0,0245	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247
<b>0,05 s</b>	0,0477	0,0503	0,0508	0,0508	0,0508	0,0508	0,0508
<b>0,2 s</b>	0,0400	0,0438	0,0442	0,0443	0,0443	0,0443	0,0443
<b>1,0 s</b>	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102
<b>Tempo (s)</b>	6,60	6,69	6,80	6,86	8,09	9,31	10,53

No caso das áreas-fontes de SILVA (2009), mostrados nas Tabelas 6-21, 6-22 e 6-23, foi necessário um ajuste nos limites para o período de 1,0 s, pois as acelerações apresentaram valores abaixo do limite inferior estabelecido. Os limites inferiores e superiores foram mudados para 0,001 s e 0,1 s e, conseqüentemente, o tamanho da divisão diminuiu para 0,005 s.

As Tabelas 6-24, 6-25 e 6-26 mostram o comparativo percentual tomando como base o processamento com o maior nível de discretização, a última coluna nas tabelas acima. Os percentuais são calculados da mesma forma que nos estudos anteriores, baseando-se nas Equações (6-1) e (6-2).

Tabela 6-24 – Percentagens em relação ao tamanho da divisão de 0,0018 s da Região Nordeste de SILVA (2009)

Tamanho da divisão (g)	0,050	0,025	0,010	0,005	0,003	0,0023
<b>PGA</b>	10,6%	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,05 s</b>	0,4%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,2 s</b>	8,5%	0,9%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>1,0 s</b>	13,2%	9,3%	4,5%	2,0%	0,8%	0,4%
<b>1,0 s ajustado</b>	5,3%	0,9%	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%
<b>Tempo (s)</b>	30,4%	29,9%	29,9%	29,9%	20,3%	9,6%

Tabela 6-25 - Percentagens em relação ao tamanho da divisão de 0,0018 s da região Sudeste de SILVA (2009)

Tamanho da divisão (g)	0,050	0,025	0,010	0,005	0,003	0,0023
<b>PGA</b>	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,05 s</b>	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,2 s</b>	3,3%	2,0%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>1,0 s</b>	25,4%	18,5%	8,8%	3,4%	1,5%	0,5%
<b>1,0 s ajustado</b>	4,2%	4,2%	4,2%	4,2%	3,5%	1,4%
<b>Tempo (s)</b>	31,8%	31,5%	31,2%	30,2%	20,3%	10,4%

Tabela 6-26 - Percentagens em relação ao tamanho da divisão de 0,0018 s da região Sudeste de SILVA (2018)

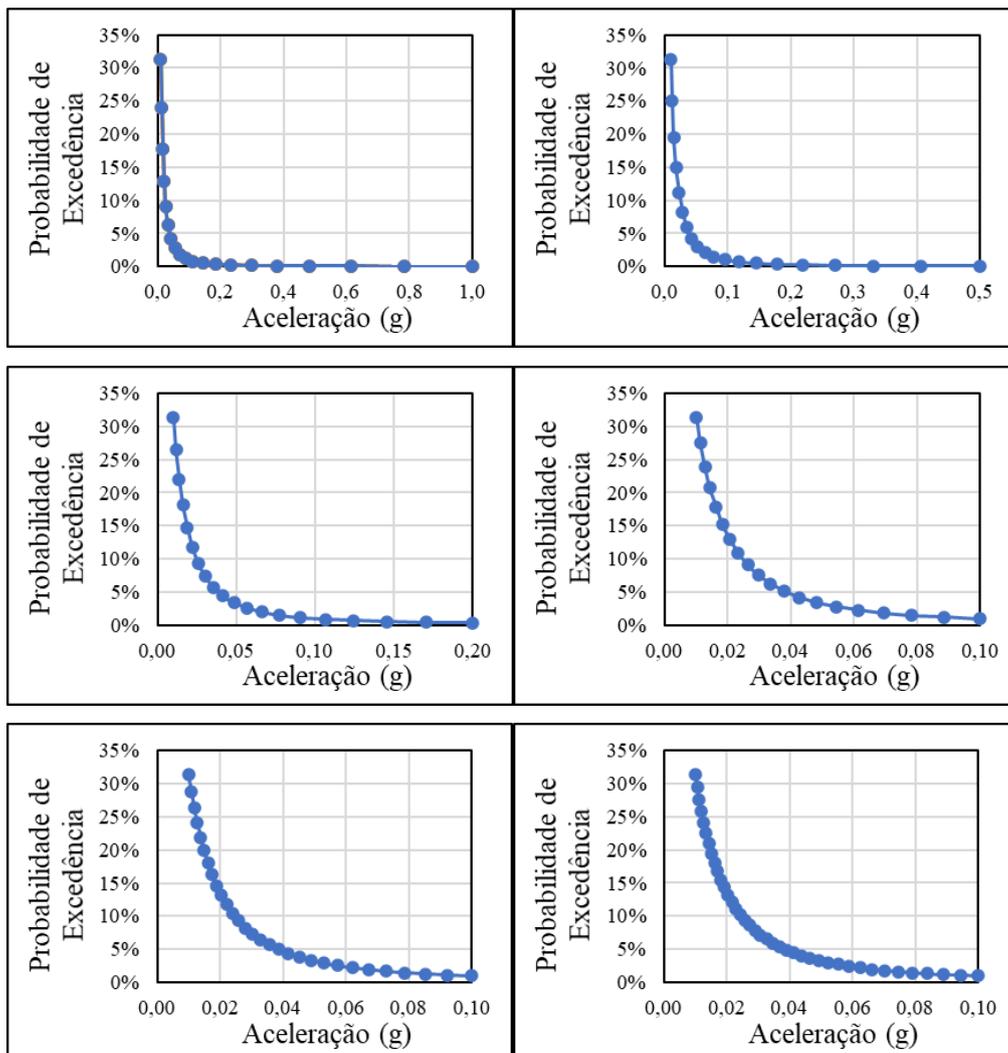
Tamanho da divisão (g)	0,050	0,025	0,010	0,005	0,003	0,0023
<b>PGA</b>	11,3%	5,7%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,05 s</b>	6,1%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,2 s</b>	9,7%	1,1%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>1,0 s</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Tempo (s)</b>	37,4%	36,4%	35,5%	34,9%	23,2%	11,6%

Observa-se nas Tabelas 6-24, 6-25 e 6-26 que as acelerações em baixos períodos convergem para o valor exato já com a segunda combinação de parâmetros, porém em altos períodos foi necessário diminuir bastante o tamanho da divisão. Ao compararmos a convergência para T=1,0 s entre o processamento não ajustado e o ajustado, nota-se que os valores não ajustados possuem erros menores nas três últimas combinações de

parâmetros, entretanto seu valor final difere bastante do valor exato encontrado no processamento ajustado.

Outro fator a ser destacado é que o tamanho de divisões maiores não incorre em um ganho temporal grande, isto é, o tempo decorrido para um processamento mais discreto é quase o mesmo de um menos discretizado.

Além dos processamentos com espaçamento linear, estudou-se também o espaçamento logarítmico. As Figuras 6-4 (a) a (g) mostram um exemplo das sete diferentes discretizações logarítmicas das Curvas de Ameaça Sísmica estudadas e, em seguida, as Tabelas 6-27, 6-28 e 6-29 mostram as acelerações para as respectivas combinações de parâmetros utilizadas anteriormente, porém não há uma definição do tamanho da divisão, pois nesta opção de espaçamento ele é variável.



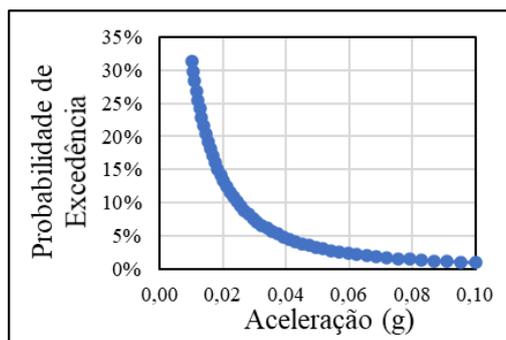


Figura 6-4 - Exemplos de Curvas de Ameaça Sísmica discretizadas logaritmicamente com sete combinações de parâmetros diferentes: (a) 0,01:1,0:20; (b) 0,01:0,5:20; (c) 0,01:0,2:20; (d) 0,01:0,1:20; (e) 0,01:0,1:30; (f) 0,01:0,1:40; (g) 0,01:0,1:50.

Tabela 6-27 - Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões logarítmicas e períodos estruturais da Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Limite Inferior (g)</b>	<b>0,01</b>						
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de divisões</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>PGA</b>	0,0300	0,0300	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301	0,0301
<b>0,05 s</b>	0,0672	0,0672	0,0672	0,0672	0,0672	0,0672	0,0672
<b>0,2 s</b>	0,0425	0,0425	0,0424	0,0424	0,0424	0,0424	0,0424
<b>1,0 s</b>	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0050	0,0050	0,0050
<b>1,0 s ajustado</b>	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047
<b>Tempo (s)</b>	1,30	1,32	1,32	1,35	1,56	1,72	1,92

Tabela 6-28 - Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões logarítmicas e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2009)

<b>Limite Inferior (g)</b>	<b>0,01</b>						
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de divisões</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>PGA</b>	0,0961	0,0961	0,0961	0,0961	0,0961	0,0961	0,0961
<b>0,05 s</b>	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212
<b>0,2 s</b>	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153	0,0153
<b>1,0 s</b>	0,0021	0,0021	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020
<b>1,0 s ajustado</b>	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
<b>Tempo (s)</b>	1,82	1,91	1,95	2,07	2,18	2,50	2,84

Tabela 6-29 - Acelerações em g e tempos de processamento para diferentes valores de limites de aceleração, número de divisões logarítmicas e períodos estruturais da Região Sudeste de SILVA (2018)

<b>Limite Infeior (g)</b>	<b>0,01</b>						
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de divisões</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>PGA</b>	0,0246	0,0246	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247
<b>0,05 s</b>	0,0507	0,0508	0,0508	0,0508	0,0508	0,0508	0,0508
<b>0,2 s</b>	0,0443	0,0443	0,0443	0,0443	0,0443	0,0443	0,0443
<b>1,0 s</b>	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102
<b>Tempo (s)</b>	7,34	7,36	7,37	7,41	8,95	10,41	11,91

Da mesma forma, as Tabelas 6-30, 6-31 e 6-32 mostram o comparativo percentual tomando como base o processamento com o maior nível de discretização, a última coluna nas tabelas acima. Os percentuais são calculados da mesma forma que nos estudos anteriores.

Tabela 6-30 - Percentagens em relação à combinação mais discretizada da Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Limite Infeior (g)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de divisões</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>PGA</b>	0,3%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,05 s</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,2 s</b>	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>1,0 s</b>	1,6%	1,4%	1,0%	0,6%	0,2%	0,0%
<b>1,0 s ajustado</b>	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%
<b>Tempo (s)</b>	32,3%	31,3%	31,3%	29,7%	18,6%	10,4%

Tabela 6-31 - Percentagens em relação à combinação mais discretizada da Região Sudeste de SILVA (2009)

<b>Limite Infeior (g)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de divisões</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>PGA</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,05 s</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,2 s</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>1,0 s</b>	3,0%	2,5%	1,5%	1,0%	0,5%	0,0%
<b>1,0 s ajustado</b>	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,0%	0,0%
<b>Tempo (s)</b>	36,0%	32,8%	31,4%	27,2%	23,2%	12,0%

Tabela 6-32 - Percentagens em relação à combinação mais discretizada da Região Sudeste de SILVA (2018)

<b>Limite Inferior (g)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Limite Superior (g)</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Número de divisões</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>PGA</b>	0,4%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,05 s</b>	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>0,2 s</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>1,0 s</b>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>Tempo (s)</b>	38,4%	38,2%	38,1%	37,8%	24,9%	12,6%

Observa-se nas Tabelas 6-27 a 6-32 que os valores exatos são conseguidos com combinações menos discretas e que os erros são bem menores do que os conseguidos com o espaçamento linear, mesmo para os altos períodos onde são necessárias mais divisões. As Figuras 6-4 (a) a (g) evidenciam como a discretização se dá de maneira mais eficiente quando comparada à discretização linear, mostradas nas Figuras 6-3 (a) a (g).

O tempo de processamento para a mesma combinação de parâmetros é sempre maior, entretanto, essa desvantagem pode ser relevada quando comparamos o tempo para o mesmo erro percentual. Nota-se, também, que a relação entre os valores ajustados e não ajustados de  $T=0,1$  s segue a mesma tendência observada nos resultados com espaçamento linear.

#### 6.6. Estudo de variação da velocidade $V_{s30}$

A velocidade média da onda de cisalhamento nos primeiros trinta metros superiores do terreno é chamada de  $V_{s30}$ . Ela é usada para classificar o terreno e a partir disso atribuir um fator de amplificação sísmica no solo (ABNT NBR 15421, 2006).

No trabalho de ATKINSON e BOORE (2006) foram desenvolvidas funções de atenuação para terrenos de rocha sã (classe A) e solo rígido (limite entre classe B e C), assim como uma função que pode ser calibrada através do valor  $V_{s30}$ . Essa função existe no R-CRISIS com o nome “*Atkinson and Boore (2006),  $V_{s30}$  explicit*” e foi usada nesse estudo para identificar a influência deste parâmetro na aceleração horizontal.

As Tabelas 6-33, 6-34 e 6-35 mostram as acelerações horizontais para sete velocidades diferentes e quatro períodos nas três configurações sísmicas já citadas nos itens anteriores.

Tabela 6-33 - Acelerações em g para diferentes Vs30 e períodos estruturais para a Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1500</b>	<b>1300</b>	<b>1100</b>	<b>900</b>	<b>760</b>
<b>PGA</b>	0,035	0,033	0,032	0,031	0,030	0,029	0,028
<b>0,05 s</b>	0,078	0,075	0,072	0,070	0,067	0,065	0,063
<b>0,2 s</b>	0,034	0,037	0,039	0,041	0,043	0,044	0,046
<b>1,0 s</b>	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Tabela 6-34 - Acelerações em g para diferentes Vs30 e períodos estruturais para a Região Sudeste de SILVA (2009)

<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1500</b>	<b>1300</b>	<b>1100</b>	<b>900</b>	<b>760</b>
<b>PGA</b>	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,009	0,009
<b>0,05 s</b>	0,024	0,023	0,023	0,022	0,021	0,021	0,020
<b>0,2 s</b>	0,012	0,013	0,014	0,015	0,015	0,016	0,017
<b>1,0 s</b>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabela 6-35 - Acelerações em g para diferentes Vs30 e períodos estruturais para a Região Sudeste de SILVA (2018)

<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1500</b>	<b>1300</b>	<b>1100</b>	<b>900</b>	<b>760</b>
<b>PGA</b>	0,027	0,026	0,026	0,025	0,025	0,024	0,024
<b>0,05 s</b>	0,058	0,056	0,054	0,053	0,051	0,049	0,048
<b>0,2 s</b>	0,036	0,039	0,041	0,043	0,044	0,046	0,048
<b>1,0 s</b>	0,009	0,009	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011

A partir dos valores encontrados foi possível deduzir fatores de transposição entre Vs30 = 1500 m/s (limite entre classe A e B) e outras classes de solo, como a razão entre as acelerações calculadas em cada velocidade. As Tabelas 6-36, 6-37 e 6-38 mostram os fatores calculados para as três configurações investigadas.

Tabela 6-36 - Fatores de transposição de acelerações para outras velocidades Vs30 para a Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1300</b>	<b>1100</b>	<b>900</b>	<b>760</b>
<b>PGA</b>	1,09	1,03	0,97	0,93	0,90	0,87
<b>0,05 s</b>	1,09	1,03	0,97	0,93	0,90	0,88
<b>0,2 s</b>	0,88	0,95	1,05	1,10	1,15	1,18
<b>1,0 s</b>	0,91	0,96	1,03	1,07	1,10	1,13

Tabela 6-37 - Fatores de transposição de acelerações para outras velocidades Vs30 para a Região Sudeste de SILVA (2009)

<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1300</b>	<b>1100</b>	<b>900</b>	<b>760</b>
<b>PGA</b>	1,04	1,02	0,98	0,96	0,94	0,93
<b>0,05 s</b>	1,08	1,03	0,97	0,94	0,91	0,89
<b>0,2 s</b>	0,87	0,94	1,05	1,10	1,15	1,19
<b>1,0 s</b>	0,93	0,97	1,03	1,06	1,09	1,11

Tabela 6-38 - Fatores de transposição de acelerações para outras velocidades Vs30 para a Região Sudeste de SILVA (2018)

<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1300</b>	<b>1100</b>	<b>900</b>	<b>760</b>
<b>PGA</b>	1,04	1,02	0,98	0,97	0,95	0,94
<b>0,05 s</b>	1,08	1,03	0,97	0,94	0,91	0,89
<b>0,2 s</b>	0,88	0,95	1,05	1,09	1,14	1,17
<b>1,0 s</b>	0,91	0,96	1,04	1,07	1,11	1,13

Observa-se pelas tabelas acima que os fatores se mantêm quase os mesmos nas três configurações sísmicas e que as acelerações no PGA e em baixos períodos são alteradas de maneiras diferentes em relação às acelerações em altos períodos. Numa transposição de um terreno de Rocha Sã ( $V_{s30} = 1500$  m/s) para um de Solo Rígido ( $V_{s30} = 760$  m/s), por exemplo, as acelerações no PGA e baixos períodos devem ser reduzidos e as acelerações em altos períodos aumentados.

Estes resultados corroboram com os trabalhos de VAN HOUTTE *et al.* (2011) e PECKER *et al.* (2017), os quais apresentam fatores de correção de acelerações de rocha sã para solo rígido para alguns GMPM, mostrados na Figura 6-5.

Esses fatores não devem ser confundidos com os fatores de amplificação sísmica do solo dados pela Tabela 3 da ABNT NBR 15421 (2006). Como explicam os autores, “[...] as funções observadas de transferência de Solo Rígido, caracterizado por  $V_{s30} > 500$  m/s exibem picos de amplificação, especialmente em altas frequências, relacionados com os efeitos locais [amplificação sísmica do solo] que não são considerados no cômputo desses fatores de ajuste.” (PECKER *et al.*, 2017, p. 69).

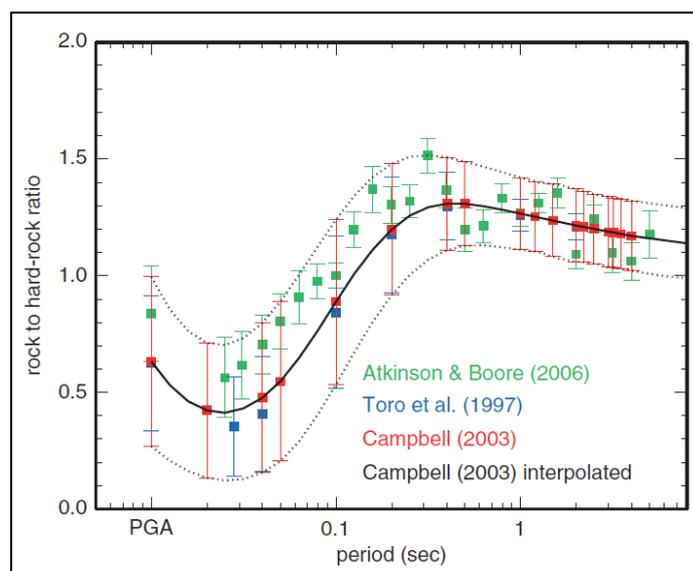


Figura 6-5 – Fatores de correção de Rocha Sã para Solo Rígido das acelerações espectrais em função dos períodos estruturais. Fonte: VAN HOUTTE *et al.* (2011).

### 6.7. Estudo de variação das dimensões da fonte sísmica

A escolha do formato e das dimensões da área-sísmica é uma parte importante da análise probabilística de ameaça sísmica. Este estudo tomou como base a área-fonte determinada por DOURADO (2014) para a região do Mato Grosso e investigou a influência do tamanho da área-fonte na aceleração horizontal em 15 períodos diferentes variando as coordenadas dos seus vértices.

A variação das dimensões foi feita alterando os vértices originais através de acréscimos e decréscimos iguais nas coordenadas, mantendo a forma original. A Tabela 6-39 mostra as coordenadas dos vértices de cada área-fonte comparada junto a sua área aproximada.

Tabela 6-39 - Coordenadas dos vértices e área das diferentes áreas-fontes

VÉRTICE	1		2		3		4		ÁREA (km <sup>2</sup> )
	LONG	LAT	LONG	LAT	LONG	LAT	LONG	LAT	
-0,1	-58,7	-10,4	-58,7	-13,7	-55,9	-13,7	-56,5	-10,4	86.400
0	-58,8	-10,3	-58,8	-13,6	-56,0	-13,6	-56,6	-10,3	100.000
+ 0,1	-58,9	-10,2	-58,9	-13,5	-56,1	-13,5	-56,7	-10,2	114.500
+ 0,2	-59,0	-10,1	-59,0	-13,4	-56,2	-13,4	-56,8	-10,1	130.000
+ 0,5	-59,3	-9,8	-59,3	-13,1	-56,5	-13,1	-57,1	-9,8	182.400
+ 1	-59,8	-9,3	-59,8	-12,6	-57,0	-12,6	-57,6	-9,3	289.000
+ 2	-60,8	-8,3	-60,8	-11,6	-58,0	-11,6	-58,6	-8,3	575.300

As Tabelas 6-40 e 6-41 mostram a comparação entre as áreas-fontes de diferentes dimensões identificados pela variação em graus de latitude e longitude aplicada aos vértices.

Tabela 6-40 - Acelerações em g para diferentes períodos e dimensões da área-fonte Mato Grosso de DOURADO (2014)

T (s)	- 0,1	0	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,5	+ 1	+ 2
<b>PGA</b>	0,045	0,042	0,039	0,036	0,028	0,020	0,012
<b>0,013</b>	0,057	0,053	0,049	0,045	0,035	0,025	0,014
<b>0,020</b>	0,081	0,075	0,068	0,063	0,049	0,035	0,020
<b>0,029</b>	0,102	0,095	0,087	0,079	0,062	0,044	0,025
<b>0,033</b>	0,105	0,098	0,089	0,082	0,065	0,046	0,027
<b>0,040</b>	0,104	0,097	0,089	0,082	0,065	0,047	0,028
<b>0,050</b>	0,103	0,097	0,089	0,082	0,066	0,048	0,028
<b>0,080</b>	0,091	0,085	0,079	0,073	0,059	0,043	0,026
<b>0,100</b>	0,085	0,080	0,074	0,069	0,056	0,041	0,024
<b>0,200</b>	0,052	0,049	0,046	0,043	0,035	0,025	0,015
<b>0,400</b>	0,028	0,026	0,024	0,022	0,018	0,013	0,008
<b>0,800</b>	0,011	0,011	0,010	0,010	0,008	0,006	0,004
<b>1,000</b>	0,009	0,008	0,008	0,008	0,007	0,005	0,004
<b>1,500</b>	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002
<b>2,000</b>	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	86.400	100.000	114.000	130.000	182.400	289.000	575.300

Tabela 6-41 - Percentagens em relação à área original para diferentes períodos e dimensões da área-fonte Mato Grosso de DOURADO (2014)

T (s)	- 0,1	0	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,5	+ 1	+ 2
<b>PGA</b>	7,1%	0,0%	-8,5%	-15,6%	-32,9%	-53,2%	-72,1%
<b>0,013</b>	7,1%	0,0%	-8,6%	-16,4%	-33,6%	-53,6%	-73,1%
<b>0,020</b>	7,5%	0,0%	-8,8%	-16,6%	-34,3%	-53,8%	-74,0%
<b>0,029</b>	7,3%	0,0%	-8,8%	-16,5%	-34,4%	-53,6%	-73,4%
<b>0,033</b>	7,7%	0,0%	-8,6%	-16,1%	-33,6%	-52,8%	-72,5%
<b>0,040</b>	7,0%	0,0%	-8,3%	-15,6%	-32,8%	-51,9%	-71,6%
<b>0,050</b>	6,6%	0,0%	-8,1%	-15,2%	-32,0%	-50,8%	-70,7%
<b>0,080</b>	6,3%	0,0%	-7,5%	-14,2%	-30,4%	-49,2%	-69,6%
<b>0,100</b>	6,0%	0,0%	-7,3%	-13,9%	-29,9%	-48,9%	-69,4%
<b>0,200</b>	5,5%	0,0%	-7,1%	-13,6%	-28,9%	-49,0%	-70,0%
<b>0,400</b>	6,2%	0,0%	-6,9%	-13,5%	-30,1%	-49,4%	-68,8%
<b>0,800</b>	3,7%	0,0%	-5,6%	-10,2%	-23,3%	-41,1%	-60,6%
<b>1,000</b>	3,5%	0,0%	-4,3%	-8,9%	-21,4%	-38,8%	-58,3%
<b>1,500</b>	2,8%	0,0%	-3,8%	-7,9%	-19,2%	-36,0%	-54,7%
<b>2,000</b>	2,9%	0,0%	-3,5%	-7,6%	-18,8%	-35,2%	-53,7%
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	-13,6%	0,0%	14,5%	30,0%	82,4%	189,0%	475,3%

Observa-se pelos dados resultados que à medida que a área aumenta as acelerações em todos os períodos diminuem, o que indica uma tendência de “diluição” da sismicidade ao longo da região. Esta variação decrescente da aceleração em relação à área parece ser exponencial e convergir para um valor constante, semelhante ao visto na região Sudeste de SILVA (2009), onde a baixa sismicidade da região fica “diluída” na sua grande área e gera um platô de aceleração constante.

Outro aspecto interessante observado na Tabela 6-41 é que a variação percentual é proporcional à aceleração, isto é, quanto maior a aceleração maior a variação percentual decorrente da mudança de área. Tal fato também pode ser notado na Figura 6-6 pelo achatamento do máximo pico dos espectros.

A Figura 6-6 mostra os Espectros de Ameaça Uniforme correspondentes às tabelas acima e a Figura 6-7 mostra o comparativo das acelerações em função das áreas para diferentes períodos estruturais.

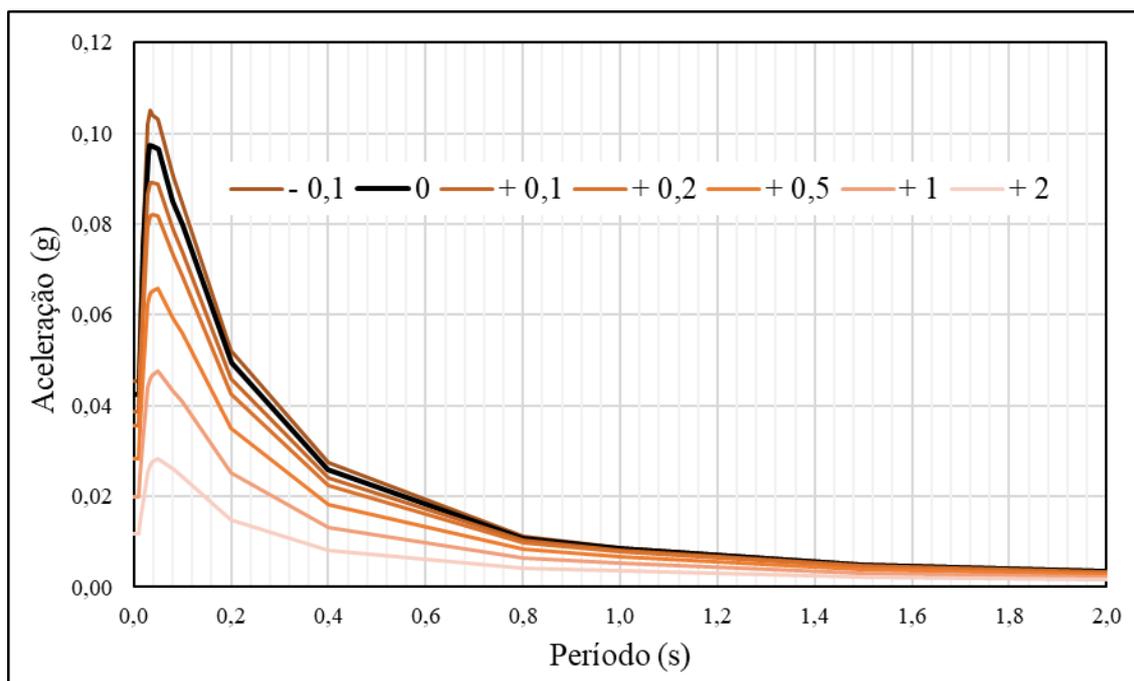


Figura 6-6 – Espectros de Ameaça Uniforme para diferentes dimensões de área-fonte, com área original destacada em preto.

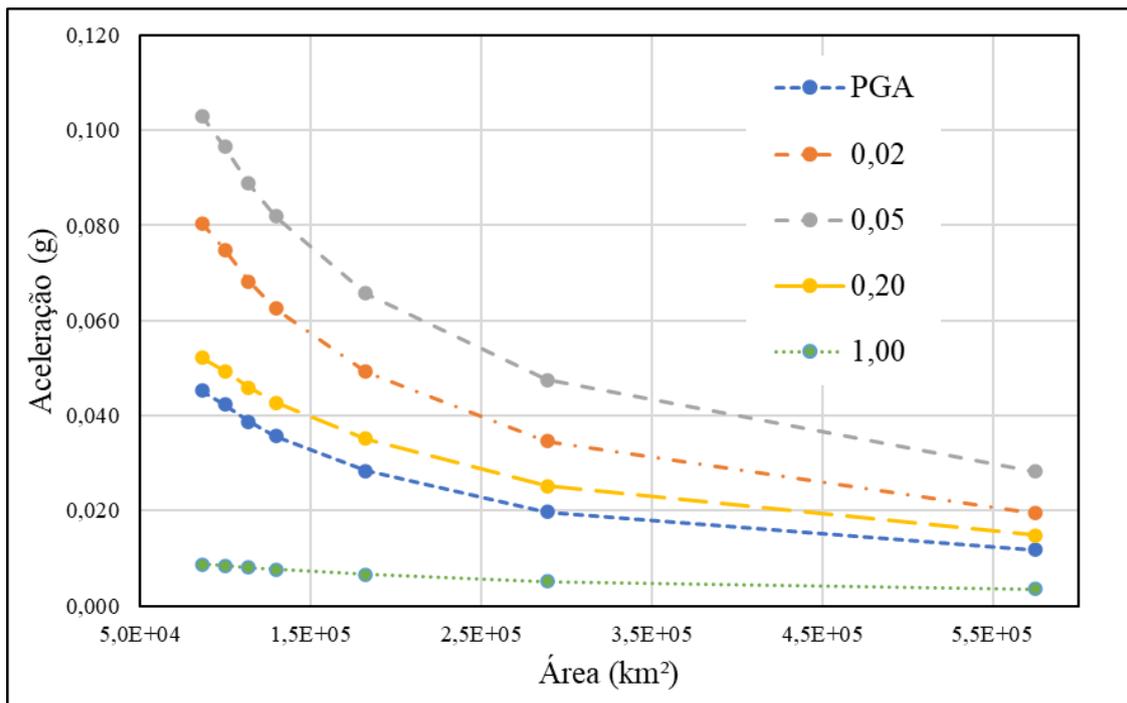


Figura 6-7 – Aceleração por área de fonte sísmica para diferentes períodos estruturais.

## 6.8. Estudo com diferentes GMPM

A fim de se investigar alternativas ao modelo de TORO *et al.* (1997) e verificar a influência dos GMPM nos resultados finais, foram testados os GMPM mais relevantes, segundo o trabalho de STEWART *et al.* (2015), embutidos no R-CRISIS aplicáveis a regiões intraplaca, chamadas também de *Stable Continental Regions (SCR)*, para as áreas-fontes consideradas por SILVA (2009) e SILVA (2018).

Uma parte dos dados de entrada foi aproveitada do processamento do capítulo anterior (geometria, sismicidade, locais de interesse), outra parte foi alterada segundo os estudos feitos nos itens anteriores, no sentido de refinar o resultado sem aumentar muito o esforço computacional. Além disso, algumas alterações para cada GMPM precisaram ser feitas de forma a padronizar os dados de entrada e de saída. A seguir, apresentam-se as mudanças feitas.

### 6.8.1. Sismicidade das Fontes Sísmicas

Os dados do processamento anterior foram aproveitados, porém aumentou-se a quantidade de magnitudes consideradas para vinte nas áreas-fontes de SILVA (2009), como mostrado na Tabela 6-42.

Tabela 6-42 – Resumo da sismicidade das fontes sísmicas para comparação de GMPM

ÁREA-FONTE	M <sub>min</sub>	$\lambda_{min}$	$\beta$	CoV de $\beta$	Quantidade de magnitudes	M <sub>max</sub>	Intervalo de incerteza de M <sub>max</sub>
SILVA (2009) Nordeste	3,5	0,24266	2,3256	0,0	20	7,0	0,0
SILVA (2018) Z. Terrestre	3,0	1,156	3,0193	0,312	20	6,0	0,3
SILVA (2018) Z. Marítima	3,0	1,539	1,7568	0,223	20	7,0	0,3

### 6.8.2. GMPM

Foram testados três GMPM embutidos no programa. No caso de TORO *et al.* (1997), foram testadas as duas escalas de magnitude disponíveis, magnitude de momento (Mw) e magnitude Lg (mbLg).

O terreno escolhido é o de classe B, Rocha segundo a ABNT NBR 15421 (2006), com Vs30 entre 760 m/s e 1.500 m/s, isto é, uma velocidade média aproximada de 1.100 m/s. As acelerações espectrais finais são dadas em g, para tanto, o *units coefficient* (coeficiente de unidade) foi alterado de acordo com a unidade de medida original do GMPM, considerando  $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ . A Tabela 6-43 mostra os modelos testados e resume os dados de origem e as alterações necessárias.

Tabela 6-43 - Relação de GMPM testados.

GMPM	Dados da GMPM				Alterações
	Escala de magnitude	Período para o PGA	Unidade de aceleração	Tipo de distância	
ATKINSON e BOORE (2006)	Mw	0,01 s	cm/s <sup>2</sup>	R <sub>RUP</sub>	<i>Units coefficient: 981</i> <i>Vs30 = 1100 m/s</i>
PEZESHK <i>et al.</i> (2018)	Mw	0,001 s	g	R <sub>RUP</sub>	<i>Method of regression: Empirical-scaling</i> <i>Units coefficient: 1</i>
TORO <i>et al.</i> (1997)	Escolhida pelo usuário	0,0 s	g	R <sub>JB</sub>	<i>Magnitude type: LG</i> <i>Magnitude e Moment magnitude</i> <i>Region: Midcontinent</i> <i>Units coefficient: 1</i>

### 6.8.3. Ordenadas Espectrais

Neste aspecto, a fim de se chegar em valores mais exatos, aumentou-se o número de ordenadas espectrais, principalmente no trecho próximo aos valores máximos dos EAU ( $0,02 \text{ s} < T < 0,10 \text{ s}$ ), e também se otimizou a faixa de acelerações, aumentando a quantidade de divisões e diminuindo o tamanho desta faixa. A Tabela 6-44 resume as informações sobre ordenadas espectrais usadas no processamento da comparação entre GMPM.

Tabela 6-44 - Resumo das Ordenadas Espectrais para comparação de GMPM.

<b>Número de divisões da aceleração</b>	40	<b>Número de Ordenadas Espectrais</b>	16	
<b>Espaçamento</b>	Linear	<b>Ordenadas Espectrais</b>	<b>Nº</b>	<b>T (s)</b>
<b>Limite inferior da aceleração</b>	0,01		1	0,0
			2	0,01
			3	0,0133
			4	0,02
			5	0,0286
			6	0,0333
<b>Limite superior da aceleração</b>	0,2		7	0,04
			8	0,05
			9	0,0667
			10	0,1
			11	0,2
			12	0,4
<b>Unidade de aceleração</b>	g		13	0,8
			14	1,0
			15	1,5
		16	2,0	

### 6.8.4. Parâmetros Globais

Neste aspecto, houve somente uma mudança. A distância máxima de integração de SILVA (2018) foi aumentada para 500 km, como mostra a Tabela 6-45.

Tabela 6-45 - Resumo dos Parâmetros Globais para comparação de GMPM.

<b>Autor</b>	<b>Distância máxima de integração (km)</b>	<b>Tamanho mínimo do triângulo (km)</b>	<b>Razão mínima Distância/Tamanho de triângulo</b>	<b>Janela temporal (anos)</b>	<b>Tempo de recorrência (anos)</b>
SILVA (2009)	500	10	7	50	475
SILVA (2018)	500	10	7	50	475

#### 6.8.5. Resultados da comparação de GMPM

As Figuras 6-8 e 6-9 mostram os EAU de cada GMPM testado para o período de recorrência de 475 anos, a primeira para região Nordeste de SILVA (2009) e a segunda para a região Sudeste de SILVA (2018). Além dos espectros comparados, são mostrados os espectros originais dos autores e os ERP da ABNT NBR 15421 (2006) para os limites superiores da Zona 0 e da Zona 1, como referência de ordem de grandeza.

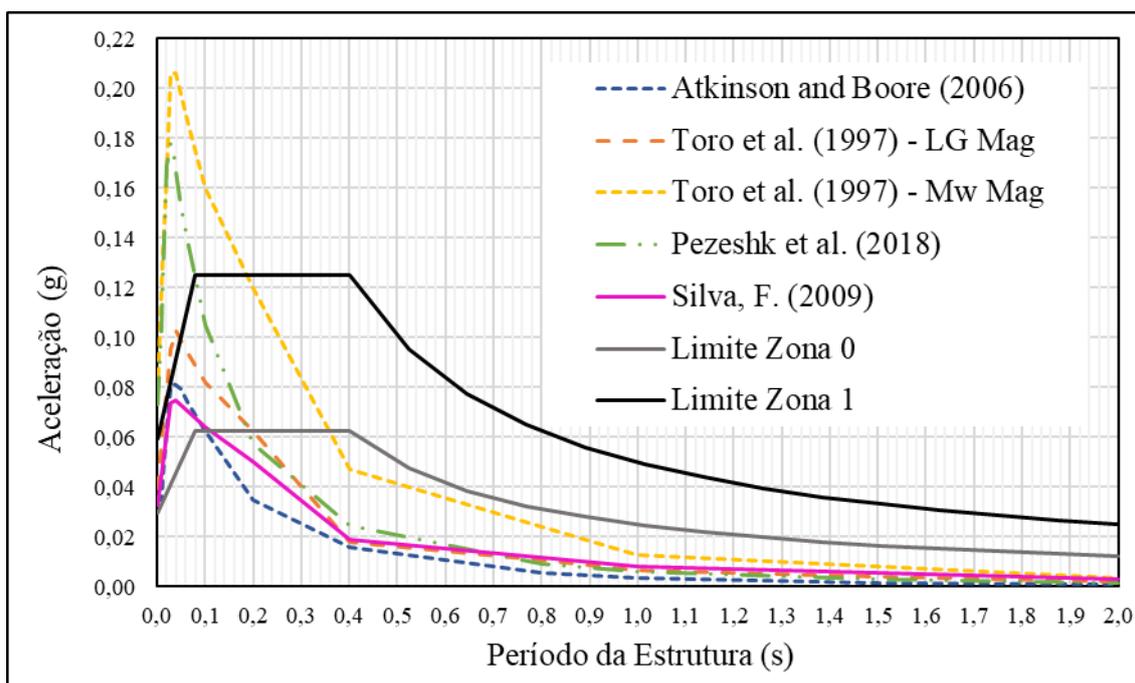


Figura 6-8 - Comparação dos EAU dos diferentes GMPM para a Região Nordeste de SILVA (2009).

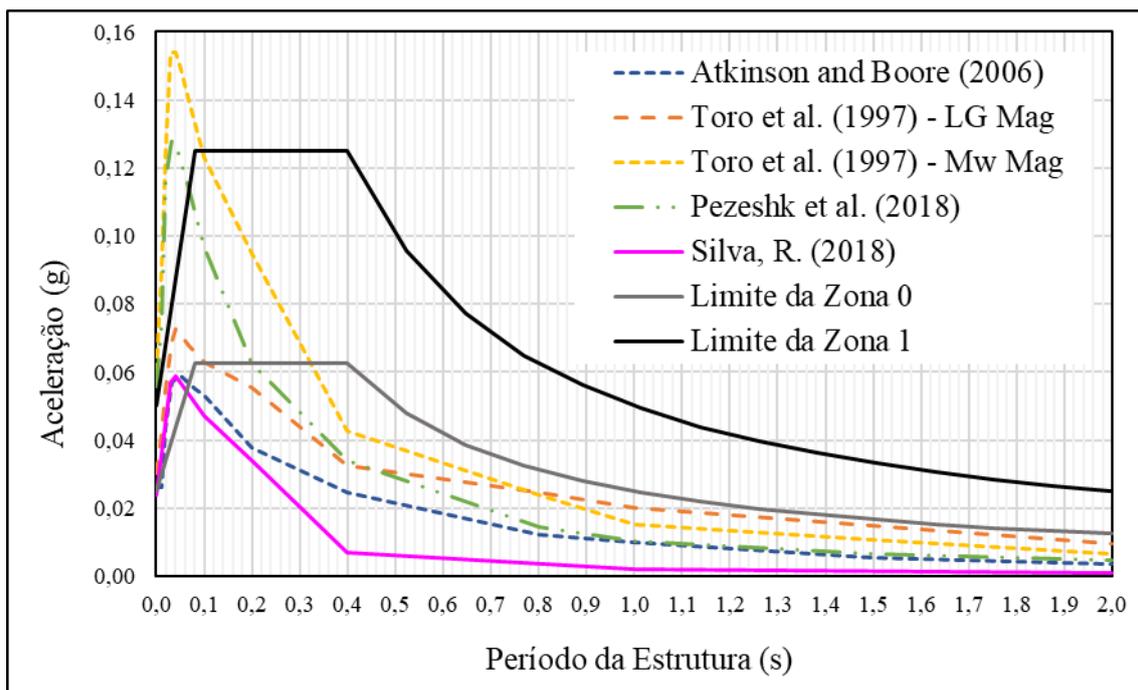


Figura 6-9 - Comparação dos EAU dos diferentes GMPM para a Região Sudeste de SILVA (2018).

Os EAU seguem o mesmo padrão de forma em ambas as regiões processadas, com valores máximos de aceleração espectral perto de  $T=0,04$  s ( $f=25$  Hz), uma mudança de inclinação bem marcada em  $T=0,4$  s ( $f=2,5$  Hz) e uma convergência regular para valores próximos a  $0,01$  g de  $T=1,0$  s a  $T=2,0$  s.

Os GMPM de TORO *et al.* (1997) e PEZESHK *et al.* (2018) foram elaborados para serem usados em regiões de Rocha Sã, Classe A, segundo a classificação da ABNT NBR 15421 (2006). Entretanto o mapa de ameaça sísmica desta norma trabalha com acelerações horizontais características para terrenos de Classe B. Isto é, uma análise de ameaça sísmica que é feita com estes modelos tende a gerar valores maiores de acelerações espectrais para altas frequências.

Tal fato pode ser verificado por estudos disponíveis na literatura, como os trabalhos de VAN HOUTTE *et al.* (2011) e PECKER *et al.* (2017), os quais apresentam fatores de correção desses GMPM de terrenos Classe A para Classe B, e explicam que “[...] os fatores de correção nos mostram que, para altas frequências, uma região de rocha sã deve amplificar mais do que uma região de rocha ‘normal’ devido a sua menor atenuação”. (PECKER *et al.*, 2017, p. 69).

A dispersão dos valores evidenciada nas Figuras 6-8 e 6-9, também é mostrada em termos quantitativos nas Tabelas 6-46 e 6-47, onde são comparados os valores da aceleração espectral de cada GMPM para o PGA, T=0,4 s e T=1,0 s, assim como a aceleração espectral máxima de cada um, independentemente do período. Os nomes dos GMPM foram abreviados para uma melhor visualização.

Tabela 6-46 - Comparação das acelerações espectrais, medidas em g, dos diferentes GMPM para a Região Nordeste de SILVA (2009)

<b>Período</b>	<b>AB06</b>	<b>TeA97 LG</b>	<b>TeA97 Mw</b>	<b>PEA18</b>	<b>Média</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>Diferença máxima</b>
PGA (0 s)	0,035	0,040	0,078	0,073	0,057	0,386	0,043
0,4 s	0,016	0,018	0,047	0,025	0,026	0,538	0,031
1,0 s	0,004	0,007	0,013	0,006	0,007	0,571	0,009
acel. max	0,082	0,103	0,206	0,178	0,142	0,415	0,124

Tabela 6-47 - Comparação das acelerações espectrais, medidas em g, dos diferentes GMPM para Região Sudeste de SILVA (2018)

<b>Período</b>	<b>AB06</b>	<b>TeA97 LG</b>	<b>TeA97 Mw</b>	<b>PEA18</b>	<b>Média</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>Diferença máxima</b>
PGA (0 s)	0,026	0,030	0,060	0,056	0,043	0,395	0,034
0,4 s	0,025	0,032	0,043	0,034	0,033	0,212	0,018
1,0 s	0,010	0,020	0,015	0,011	0,014	0,357	0,010
acel. max	0,059	0,073	0,154	0,128	0,103	0,437	0,095

Observa-se claramente pelas figuras e tabelas acima que a escolha do GMPM altera drasticamente os resultados da análise, de tal forma que um mesmo local pode ser caracterizado em zonas sísmicas diferentes a depender desta escolha. Por exemplo, a diferença entre acelerações no PGA na Região Sudeste chega a 0,034 g, o que pode significar uma mudança para duas zonas sísmicas acima (de Zona 0 para Zona 2). Outro exemplo é a diferença nos valores máximos de aceleração espectral que chega a 0,124 g, valor maior que o dobro da diferença entre zonas sísmicas. Esta grande variabilidade dos possíveis resultados torna a escolha de um valor médio ou de um valor máximo em critérios não razoáveis e, por conseguinte, demanda um estudo mais detalhado sobre o assunto por parte do analista.

## 6.9. Formulação de GMPM Híbridos para o Brasil

Como visto, a escolha de um modelo de previsão de movimentos do solo pode alterar muito os resultados da análise. A fim de dirimir este problema, adota-se comumente o método da árvore lógica e, com isso, diminuem-se as incertezas epistêmicas do modelo. Na formulação de um GMPM aplicável ao território nacional, adotou-se neste trabalho uma versão simplificada de árvore lógica, onde se considerou apenas a ramificação devido aos diferentes GMPM. Isso foi possível ao se criar um GMPM híbrido, atribuindo pesos diferentes a cada GMPM que o compõe, o que segundo ORDAZ e SALGADO-GÁLVEZ (2019), levará aos mesmos resultados de uma árvore lógica.

Inicialmente, considera-se uma similaridade entre a situação da Europa e a do Brasil. Segundo DELAVALD *et al.* (2012), as regiões intraplacas na Europa podem ser subdivididas em dois tipos: *Shields e Continental Crust* (Escudos e Crosta Continental). Para o primeiro tipo, DELAVALD *et al.* (2012) recomendam utilizar somente GMPM do tipo *Stable Continental Region* (SCR) e, para o segundo, combinar GMPM do tipo SCR com os do tipo *Active Shallow Crustal Region* (ASCR). Nas Figuras 6-10 e 6-11, podemos observar em detalhe as províncias geológicas da Europa e do Brasil respectivamente e na Figura 6-12 um mapa geral das províncias geológicas do mundo. Apesar da nomenclatura diferente, nota-se na Figura 6-10 que há pequenas faixas de Crosta Continental nos litorais do Sudeste e Nordeste brasileiro, assim como na bacia do Rio Amazonas condizentes com os detalhes da Figura 6-11.

Desta forma, foram produzidos dois GMPM híbridos, um somente com GMPM do tipo SCR aplicável às regiões do Mato Grosso e Centro-Oeste, e outro combinando GMPM do tipo SCR e ASCR aplicável às regiões Sudeste, Nordeste e do Amazonas. Os modelos de previsão de movimentos do solo foram escolhidos baseados nas orientações de STEWART *et al.* (2015), os quais apresentam um procedimento para escolha de um GMPM para o *Global Earthquake Model* (GEM) e um estudo comparativo bem detalhado das diversas características desses modelos.

Para regiões caracterizadas como SCR, STEWART *et al.* (2015) recomendam o uso dos modelos de PEZESHK *et al.* (2011), ATKINSON e BOORE (2006, 2011), SILVA *et al.* (2002) e TORO *et al.* (1997) revisado por TORO (2002). Devido à versão do R-CRISIS utilizada possuir apenas alguns desses modelos embutidos, foram necessárias algumas adaptações.

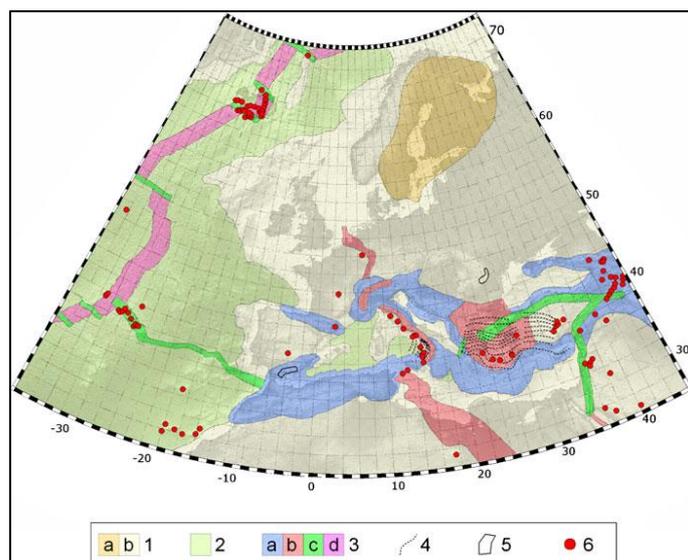


Figura 6-10 - Províncias geológicas da Europa: 1-SCR (a) Escudo, (b) Crosta continental; 2-Crosta Oceânica; 3-ASCR; 4-Zona de Subducção; 5-Atividade sísmica profunda sem subducção; 6-Vulcões ativos ou atividades termais e magmáticas.

Fonte: DELAUAUD (2012).

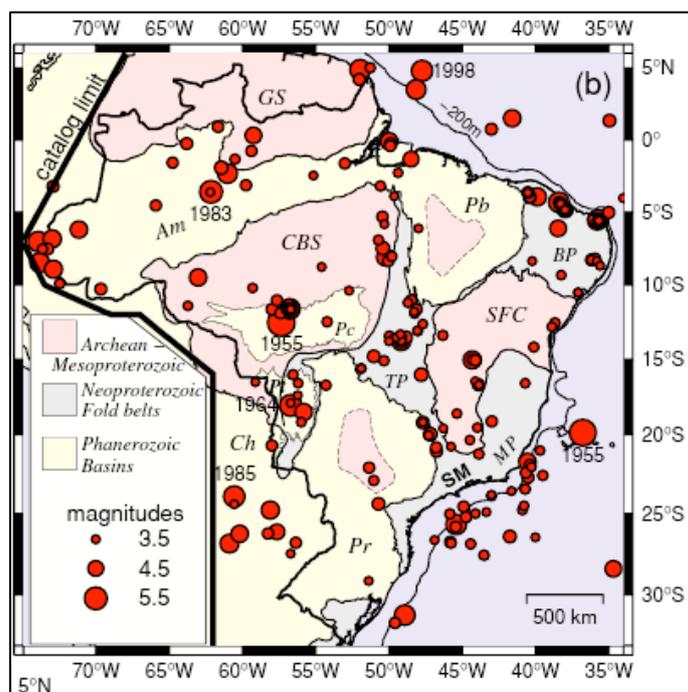


Figura 6-11 - Províncias geológicas do Brasil - Áreas cratônicas ou SCR – Rosa; Bacias intracratônicas - Amarelo; Cinturão de dobramento Brasiliano – Cinza.

Fonte: Adaptado de ASSUMPCÃO *et al.* (2014).

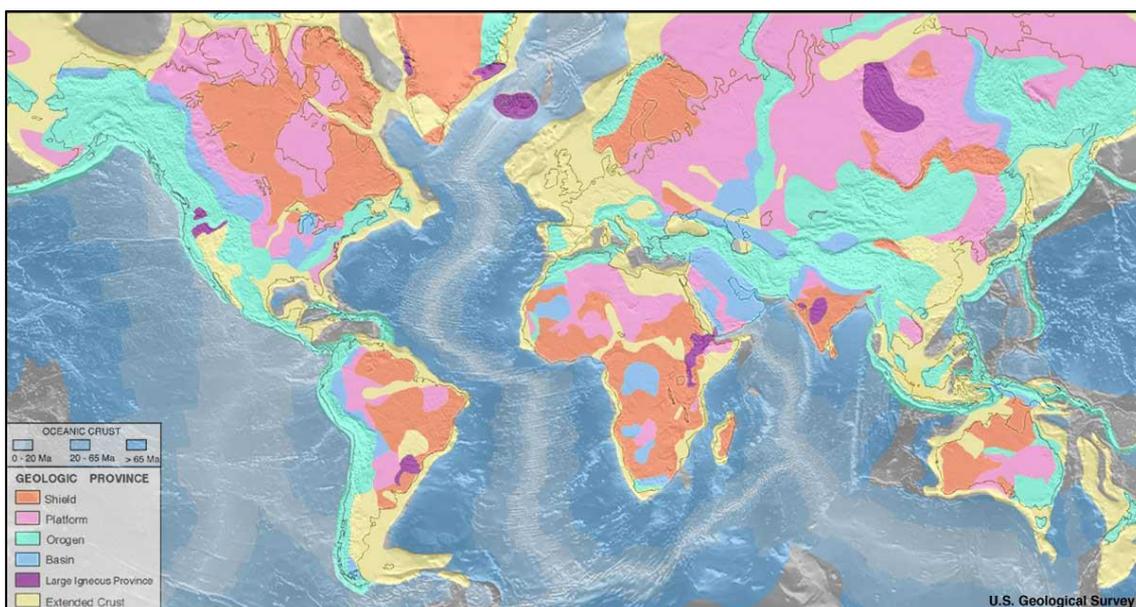


Figura 6-12 - Províncias geológicas do mundo. Fonte: USGS (2020).

O modelo de PEZESHK *et al.* (2018) foi utilizado em substituição ao PEZESHK *et al.* (2011), pois é uma versão mais atualizada do mesmo e mantém as vantagens da versão antiga destacadas por STEWART *et al.* (2015). Os modelos de TORO *et al.* (1997) e de ATKINSON e BOORE (2006) foram utilizados, pois suas versões mais atualizadas não estão na lista de modelos embutidos, assim como, o modelo de SILVA *et al.* (2002).

Para regiões caracterizadas como ASCR, STEWART *et al.* (2015) recomendam o uso dos modelos de AKKAR e BOMMER (2010), CHIOU e YOUNGS (2008) e ZHAO *et al.* (2006). Todos estes modelos encontram-se embutidos no R-CRISIS, porém ZHAO *et al.* (2006) está caracterizado como modelo de zonas de subducção (SZ). O modelo de CHIOU e YOUNGS (2014) foi utilizado em substituição a sua versão mais antiga.

Os três modelos utilizados para regiões SCR foram gerados a partir de dados das regiões central e leste da América do Norte. Devido à escassez de registros de terremotos nestas regiões, não é possível desenvolver um GMPM diretamente de uma análise de regressão dos dados empíricos. Em vez disso, adota-se um modelo estocástico de movimentos do solo causados por terremotos para gerar dados simulados e assim formular um GMPM.

O modelo de TORO *et al.* (1997) fornece funções de atenuação de acelerações espectrais para região central e leste da América do Norte (*Central and Eastern North America – CENA*), derivados de um modelo estocástico classificado como *Single-corner frequency point-source model*. Este modelo assume que a origem do terremoto se concentra em um único ponto e usa uma representação simplificada de liberação de energia sísmica e de propagação de ondas para obter uma previsão da amplitude do movimento do solo, dados a magnitude e a profundidade do terremoto, a distância entre a fonte sísmica e o local afetado e os valores dos parâmetros do próprio modelo. Este modelo é aplicável em regiões de rocha sã e trabalha com valores de períodos de 0 a 2 s e distâncias de 1 a 500 km.

O modelo de ATKINSON e BOORE (2006) fornece funções de atenuação de acelerações espectrais para região leste da América do Norte (*Eastern North America – ENA*), derivados de um modelo estocástico classificado como *finite-fault model*. Este modelo assume que uma falha é constituída de pequenas “subfalhas”, as quais podem ser consideradas fontes pontuais de terremotos que agem defasadas no tempo. Este modelo é aplicável em regiões de rocha sã, mas consegue ser ajustado pelo valor de  $V_{s30}$  para outras condições de terreno e trabalha com valores de períodos de 0,01 a 5 s e distâncias de 1 a 1000 km.

O modelo de PEZESHK *et al.* (2018) utiliza uma abordagem diferente dos dois anteriores, chamada de *hybrid empirical method*. Este método estima parâmetros de movimento do solo para a região central e leste dos EUA (chamada região alvo) a partir dos GMPM empíricos existentes da região oeste dos EUA (chamada região hospedeira). Isso é possível através de fatores modificadores, os quais são calculados como a razão entre os valores encontrados por modelos estocásticos das duas regiões. Assim, as diferenças entre as estimativas estocásticas e empíricas da região hospedeira podem ser utilizadas na elaboração de um modelo empírico híbrido para a região alvo. Este modelo é aplicável em regiões de rocha sã e trabalha com valores de períodos de 0,01 a 10 s e distâncias de 1 a 1000 km.

Diferentemente dos modelos SCR, os três modelos ASCR foram elaborados através de regressão dos dados empíricos. Assim, a diferença principal entre eles é a fonte dos dados.

AKKAR e BOOMER (2010) utilizam os dados sísmicos da Europa e Oriente Médio, e o modelo é aplicável em regiões de vários tipos de terreno, inclusive rocha, trabalhando com valores de períodos de 0 a 3 s, e distâncias de 0 a 100 km.

CHIOU e YOUNGS (2014) utilizam dados do oeste da América do Norte, e o modelo é aplicável em regiões de vários tipos de terreno ajustadas através do valor de Vs30, trabalhando com valores de período de 0 a 10 s, e distâncias de 0 a 300 km.

ZHAO *et al.* (2006) utilizam dados do Japão, EUA e Irã, é o modelo é aplicável em regiões de vários tipos de terreno, inclusive rocha, trabalhando com valores de período de 0 a 5 s, e distâncias de 0 a 300 km.

A Tabela 6-48 resume os dados originais de cada GMPM utilizado e as alterações necessárias aos modelos para o processamento.

Tabela 6-48 - Relação de GMPM utilizados no processamento das regiões brasileiras.

GMPM	Dados da GMPM				Alterações
	Escala de magnitude	Período para o PGA	Unidade de aceleração	Tipo de distância	
TORO <i>et al.</i> (1997)	Escolhida pelo usuário	0,0 s	g	R <sub>JB</sub>	<i>Magnitude type: LG ; Magnitude Region: Midcontinent</i> <i>Units coefficient: 1</i>
ATKINSON e BOORE (2006)	Mw	0,01 s	cm/s <sup>2</sup>	R <sub>RUP</sub>	<i>Units coefficient: 981</i> <i>Vs30: 1100 m/s</i>
PEZESHK <i>et al.</i> (2018)	Mw	0,001 s	g	R <sub>RUP</sub>	<i>Method of regression: Empirical-scaling</i> <i>Units coefficient: 1</i>
AKKAR e BOMMER (2010)	Mw	0,0 s	cm/s <sup>2</sup>	R <sub>JB</sub>	<i>Fault Type: Reverse</i> <i>Ground Type: CY Rock</i> <i>(Vs30 = 1130 m/s)</i> <i>Units coefficient: 981</i>
CHIOU e YOUNGS (2014)	Mw	0,0 s	g	R <sub>RUP</sub>	<i>Fault mechanism: Unspecified</i> <i>Sigma Type: Model Sigma</i> <i>Vs determination: Measured</i> <i>Units coefficient: 1</i> <i>Vs30 = 1100 m/s</i>
ZHAO <i>et al.</i> (2006)	Mw	0,0 s	cm/s <sup>2</sup>	R <sub>RUP</sub>	<i>Soil Type: Vs30&gt;1100 m/s (rock)</i> <i>Source mechanism: crustal reverse</i> <i>Units coefficient: 981</i>

A partir dos GMPM escolhidos produziram-se dois modelos híbridos estipulando pesos para cada um deles, Híbrido 1 para o Mato Grosso e Centro-Oeste e Híbrido 2 para o Sudeste, Nordeste e Amazonas.

A Tabela 6-49 resume os pesos e percentagens estipulados para cada GMPM que compõem os modelos híbridos. Os nomes dos GMPM foram abreviados para melhor visualização.

Tabela 6-49 - Resumo da composição dos GMPM híbridos

HÍBRIDO	GMPM	Peso	Peso %
1	TEA97	7	50%
	AB06	4	29%
	PEA18	3	21%
2	TEA97	7	35%
	AB06	4	20%
	PEA18	3	15%
	AkBo10	2	10%
	CY14	2	10%
	ZEA06	2	10%

Em ambos os casos o maior peso foi atribuído ao modelo de TORO *et al.* (1997), pois trabalha com uma escala de magnitude ajustada aos dados e é largamente usado na literatura brasileira sobre o assunto. O modelo de ATKINSON e BOORE (2006) recebeu um peso um pouco maior que PEZESHK *et al.* (2018), pois possibilita o ajuste para terrenos tipo rocha, enquanto PEZESHK *et al.* (2018) trabalha com valores para rocha sã. No caso do Híbrido 2, os pesos dos modelos SCR se mantiveram e os modelos ASCR receberam pesos iguais, mas sempre menores do que os demais. Considerou-se que, apesar da influência de terremotos com características de ASCR, as regiões estudadas são predominantemente afetadas por terremotos com características de SCR.

Os modelos híbridos gerados foram testados na Região Sudeste de SILVA (2018), considerando os parâmetros estabelecidos no item anterior, para avaliar a característica e conformidade de seus EAU. As Figuras 6-13 e 6-14 mostram o EAU dos híbridos em destaque e o EAU dos GMPM que os compõem em escala padrão e em escala logarítmica respectivamente.

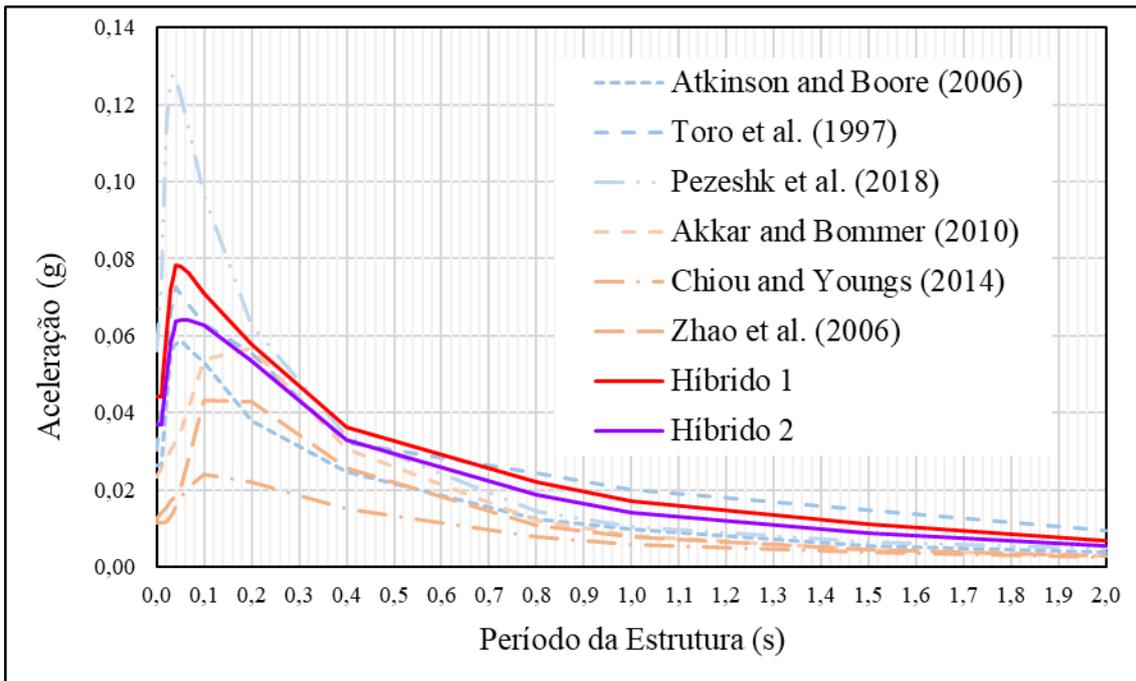


Figura 6-13 - EAU dos Híbridos 1 e 2 em destaque e os EAU dos GMPM do tipo SCR e ASCR, gerados a partir da Região Sudeste de SILVA (2018).

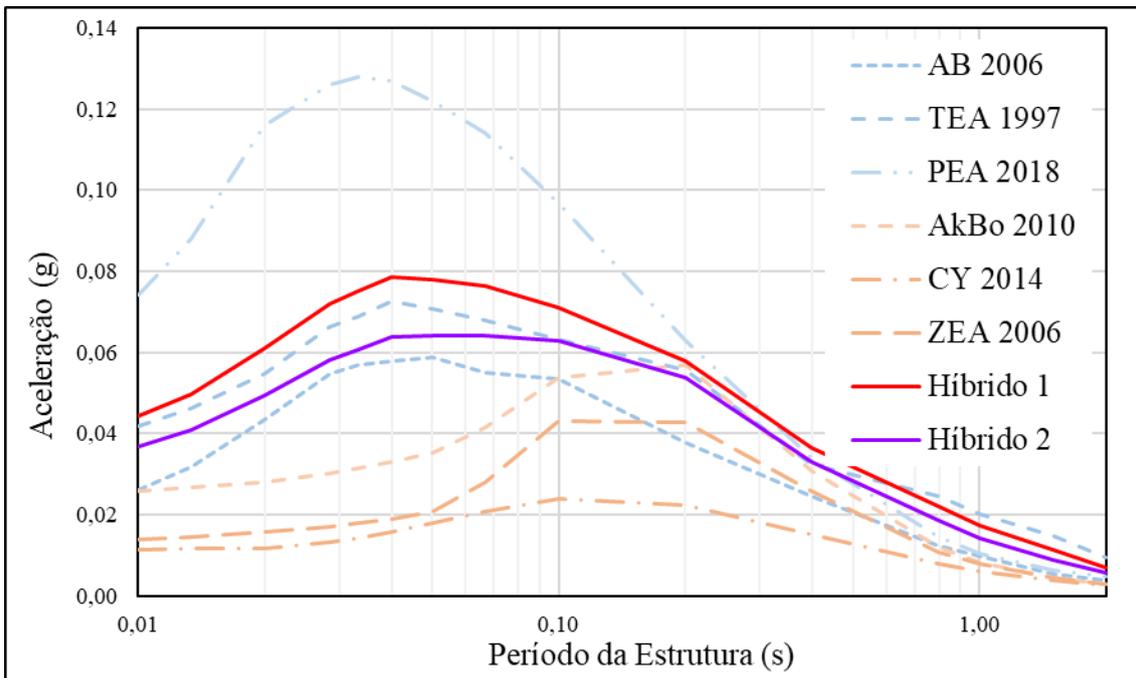


Figura 6-14 - EAU dos Híbridos 1 e 2 em destaque e os EAU dos GMPM do tipo SCR e ASCR, gerados a partir da Região Sudeste de SILVA (2018), em escala logarítmica.

O EAU do Híbrido 1 apresenta um formato mais esbelto com valor máximo bem destacado em  $T=0,04$  s (25 Hz) e valores sempre maiores que o do Híbrido 2. O EAU do Híbrido 2 apresenta um pequeno patamar de acelerações próximas à máxima em  $T=0,04$  s a  $T=0,1$  s e, após  $T=0,4$  s, se comporta de maneira semelhante ao do Híbrido 1.

Os aspectos de ambos EAU seguem o resultado esperado. Ambos apresentam valores maiores em baixos períodos, característicos de regiões SCR, porém, devido a contribuição dos GMPM do tipo ASCR, o segundo híbrido apresenta valores um pouco menores e o valor máximo ocorre um pouco mais tarde.

## 7. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA AMEAÇA SÍSMICA DO BRASIL

A análise probabilística da ameaça sísmica brasileira apresentada neste capítulo é baseada no trabalho de DOURADO (2014), o qual estipula oito áreas-fontes localizadas em diversas regiões do Brasil com atividade sísmica significativa (Figura 7-1), além de suas respectivas relações de Gutenberg-Richter. Considerou-se que os agrupamentos de terremotos predecessores e sucessores (“*foreshocks*” e “*aftershocks*”) foram removidos e que os dados foram tratados segundo a completude no tempo. A partir desses dados, juntamente com as informações obtidas nos estudos apresentados neste trabalho, foi possível processar alguns modelos no R-CRISIS a fim de traçar Espectros de Ameaça Uniforme (EAU) para as diversas regiões brasileiras.

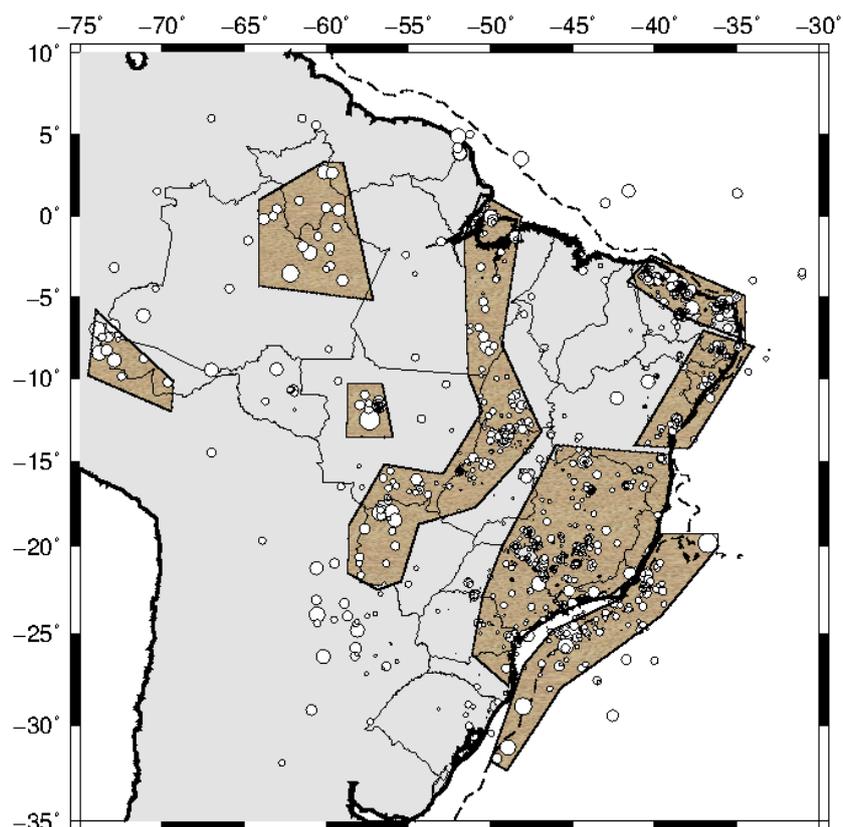


Figura 7-1 - Áreas-fontes consideradas por DOURADO (2014).

A área-fonte referente ao Acre não foi levada em conta nesta análise, pois o trabalho de DOURADO (2014) não considerou a contribuição da sismicidade andina na região,

isto é, não considerou os terremotos com epicentro fora do território brasileiro que afetam esta região, nem considerou as diferentes fontes geológicas da área e suas diferentes profundidades. Um estudo específico para esta região será apresentado no item 7.8.

### 7.1. Pontos de interesse

A Tabela 7-1 apresenta os pontos de interesse de cada região investigada, para as quais foram calculados os seus respectivos EAU.

Tabela 7-1 – Pontos de interesse das diversas regiões

REGIÃO	NOME	LONGITUDE	LATITUDE
Sudeste	Ponto Crítico em terra	-42,00	-23,00
Nordeste	Ponto Crítico em terra	-37,00	-5,00
Centro-Oeste	Ponto Crítico	-49,50	-13,50
Mato Grosso	Ponto Crítico	-57,50	-12,00
Amazonas	Ponto Crítico	-61,50	-1,25

### 7.2. Geometria das fontes sísmicas

As Tabelas 7-2 a 7-8 e as Figuras 7-2 a 7-8 apresentam as coordenadas dos vértices das áreas-fontes de cada região. As Regiões Sudeste e Nordeste foram processadas com duas áreas-fontes cada, as demais com apenas uma. A profundidade para todos os vértices é de 8 km e foram adotados os valores de BRUNE (1970) para  $k1$  e  $k2$ .

A área-fonte Plataforma Continental, componente da Região Sudeste, foi alterada, pois a mesma interceptava parte do continente (litoral norte do Estado do Rio de Janeiro) e, assim, atribuía a sismicidade referente à região oceânica a uma região em terra. A alteração foi feita apenas no vértice 2, diminuiu-se o valor da área em cerca de 2%, e a sismicidade da área-fonte não foi alterada, uma vez que não houve exclusão ou inserção de dados de terremotos aos já considerados.

Tabela 7-2 - Vértices da área-fonte Sul-Sudeste

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-46,00	-14,00
2	-49,40	-20,20
3	-50,50	-22,80
4	-51,10	-26,20
5	-48,90	-27,90
6	-48,50	-25,70
7	-47,80	-25,00
8	-45,60	-23,70
9	-42,60	-22,80
10	-40,70	-21,40
11	-39,00	-16,60
12	-39,10	-14,50

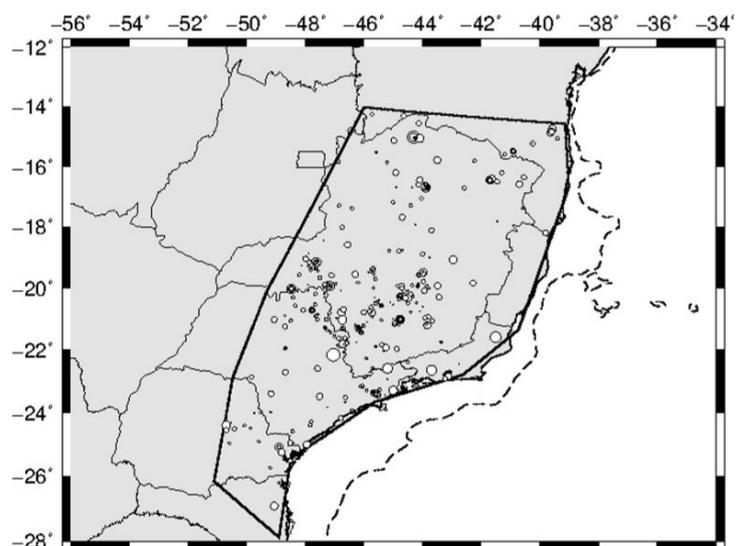


Figura 7-2 - Detalhe da área-fonte Sul-Sudeste. Fonte: DOURADO (2014).

Tabela 7-3 - Vértices da área-fonte Plataforma Continental

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-39,50	-19,30
2	-41,42	-22,75
3	-46,20	-24,80
4	-48,00	-26,80
5	-50,00	-31,90
6	-49,00	-32,40
7	-45,70	-28,00
8	-39,60	-24,00
9	-36,10	-20,00
10	-36,10	-19,30

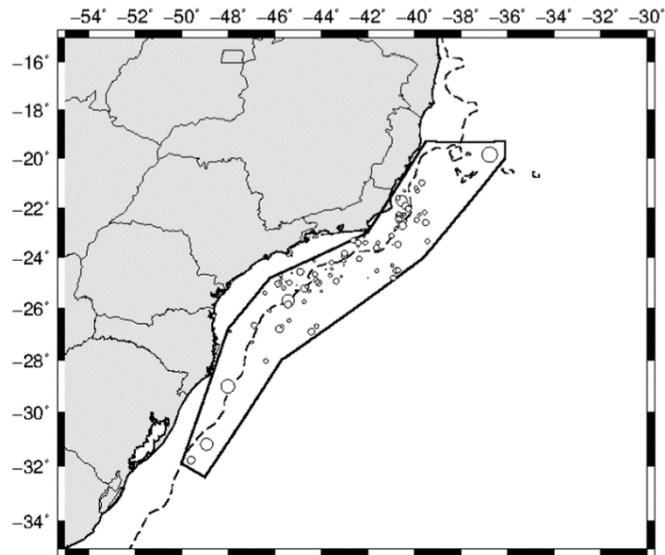


Figura 7-3 - Detalhe da área-fonte Plataforma Continental. Fonte: DOURADO (2014).

Tabela 7-4 - Vértices da área-fonte Nordeste 1

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-40,20	-2,45
2	-41,70	-4,00
3	-38,50	-6,10
4	-34,50	-7,65
5	-34,50	-4,95

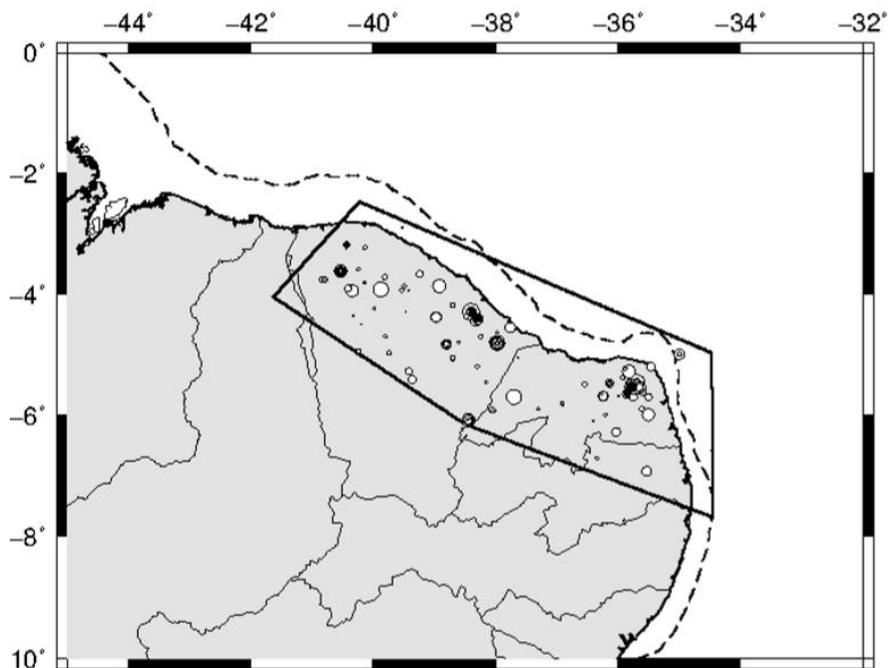


Figura 7-4 - Detalhe da área-fonte Nordeste 1. Fonte: DOURADO (2014).

Tabela 7-5 - Vértices da área-fonte Nordeste 2

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-37,00	-7,00
2	-41,30	-14,10
3	-37,90	-14,30
4	-34,00	-8,00

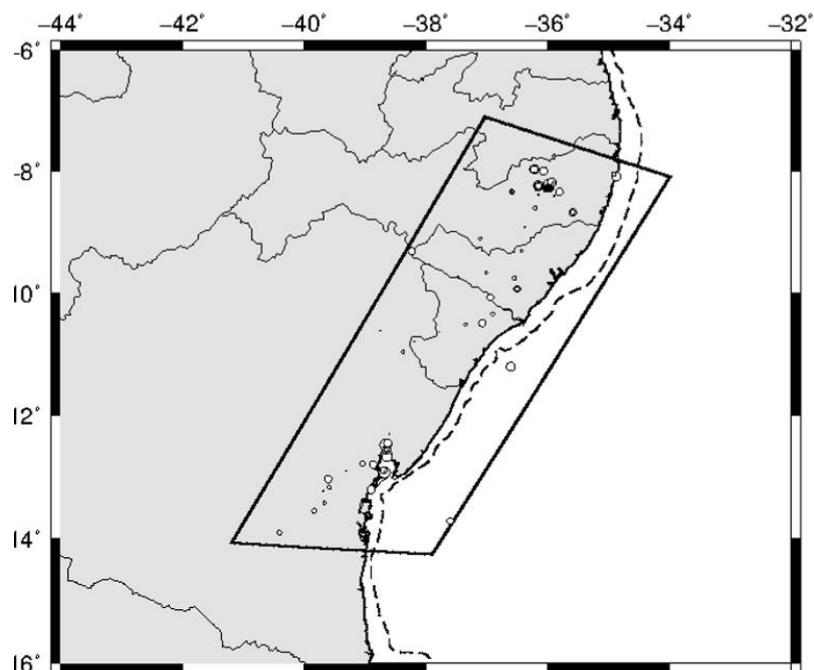


Figura 7-5 - Detalhe da área-fonte Nordeste 2. Fonte: DOURADO (2014).

Tabela 7-6 - Vértices da área-fonte Centro-Oeste

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-50,60	1,40
2	-51,60	-1,30
3	-51,40	-9,80
4	-50,50	-12,00
5	-52,90	-15,80
6	-56,50	-15,20
7	-58,70	-18,80
8	-58,70	-21,60
9	-56,90	-22,60
10	-55,50	-22,10
11	-54,90	-18,80
12	-52,00	-17,80
13	-48,30	-15,00
14	-46,90	-13,20
15	-49,90	-8,00
16	-48,10	0,00

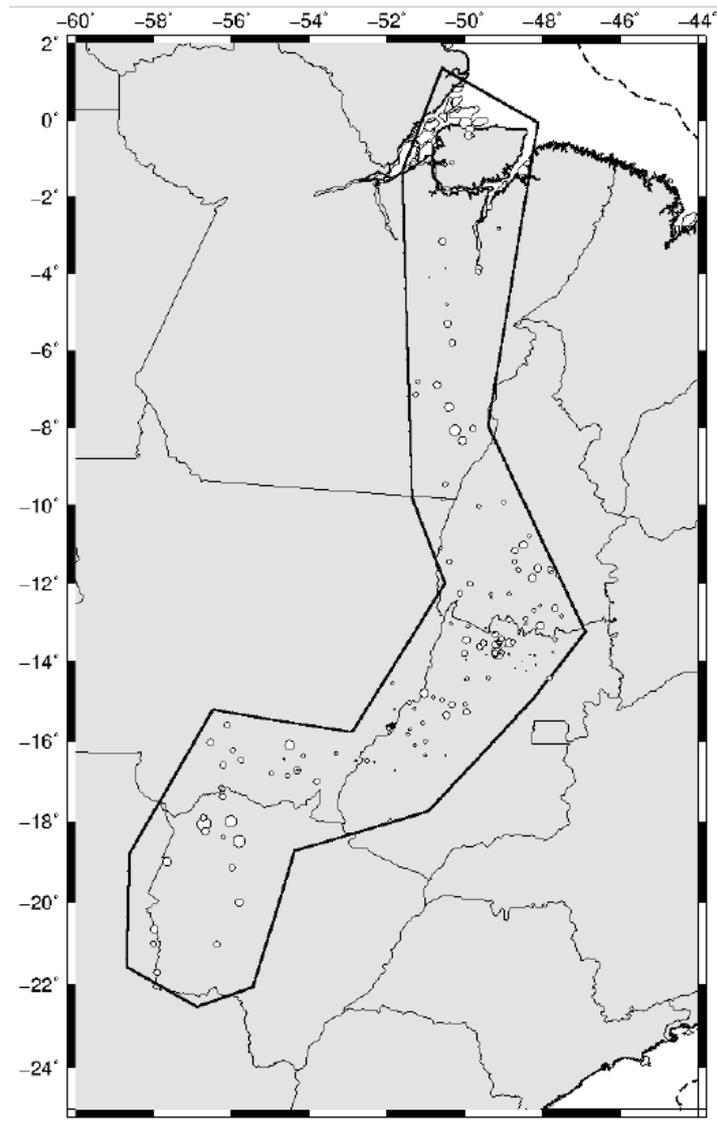


Figura 7-6 - Detalhe da área-fonte Centro-Oeste. Fonte: DOURADO (2014).

Tabela 7-7 - Vértices da área-fonte Mato Grosso

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-58,80	-10,30
2	-58,80	-13,60
3	-56,00	-13,60
4	-56,60	-10,30

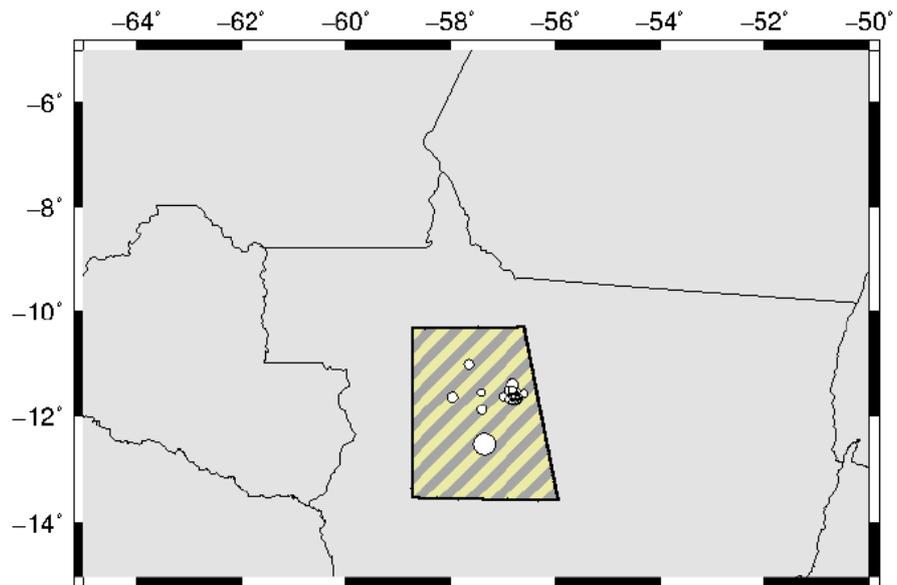


Figura 7-7 - Detalhe da área-fonte Mato Grosso. Fonte: DOURADO (2014).

Tabela 7-8 - Vértices da área-fonte Amazonas

VÉRTICE	LONGITUDE	LATITUDE
1	-64,20	1,00
2	-64,20	-4,30
3	-57,10	-5,20
4	-59,00	3,30
5	-60,20	3,30

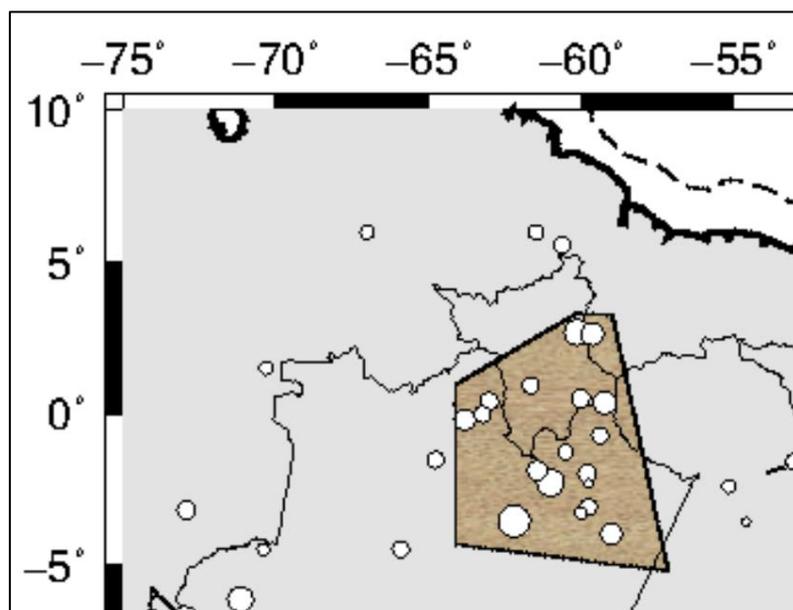


Figura 7-8 - Detalhe da área-fonte Amazonas. Fonte: Adaptado de DOURADO (2014).

### 7.3. Sismicidade das fontes sísmicas

Na Tabela 7-9, há o resumo dos dados de sismicidade de cada área-fonte, os mesmos adotados por DOURADO (2014). A quantidade de magnitudes é igual a 20 em todas as áreas-fontes.

Tabela 7-9 – Resumo dos dados de sismicidade das áreas-fontes

ÁREA-FONTE	$M_{\min}$	$\lambda_{\min}$	$\beta$	CoV de $\beta$	$M_{\max}$	Intervalo de incerteza de $M_{\max}$
Sul-Sudeste	3,0	2,4425	3,0834	0,221	6,0	0,3
Plataforma Continental	3,0	1,5390	1,7568	0,223	7,0	0,3
Nordeste 1	3,0	1,7477	2,2033	0,166	6,5	0,3
Nordeste 2	3,0	0,7537	2,5368	0,314	5,5	0,3
Centro-Oeste	3,0	2,0301	2,5116	0,183	6,0	0,3
Mato Grosso	3,0	0,7375	1,9501	0,219	6,5	0,3
Amazonas	3,0	0,3755	1,4868	0,275	6,5	0,3

### 7.4. GMPM

Os GMPM escolhidos para esta análise foram o Híbrido 1 e Híbrido 2 formulados no item 6.2. O primeiro, elaborado somente com GMPM de regiões SCR, foi aplicado às regiões Centro-Oeste e Mato Grosso e o segundo, elaborado combinando GMPM de regiões SCR e ASCR, foi aplicado às regiões Sudeste, Nordeste e Amazonas.

### 7.5. Ordenadas Espectrais

As ordenadas espectrais foram escolhidas de acordo com os modelos a serem processados, a fim de otimizar o esforço computacional e melhor apresentar os resultados. Para tanto, as ordenadas espectrais foram ajustadas para refinar os valores de aceleração perto de  $T=0,04$  s ( $f=25$  Hz), onde as GMPM de regiões SCR atingem seus valores máximos, e entre  $T=0,1$  s ( $f=10$  Hz) e  $T=0,2$  s ( $f=5$  Hz), onde as GMPM de regiões ASCR atingem seus valores máximos. Os limites inferior e superior de acelerações foram otimizados de maneira a manter a faixa de acelerações próxima dos valores finais obtidos. A Tabela 7-10 apresenta o resumo dos dados utilizados nestes processamentos.

Vale ressaltar que o PGA dos GMPM híbridos é calculado em  $T=0,01$  s (100 Hz), pois se pauta no maior valor de período dentre os considerados pelos GMPM que os

compõem. Isto é, o valor de aceleração espectral para o PGA pode ser considerado conservador neste aspecto, uma vez que há modelos em que a diferença entre acelerações calculadas para o PGA e para  $T=0,01$  s são consideráveis.

Tabela 7-10 - Resumo das Ordenadas Espectrais para processamento dos Híbrido 1 e Híbrido 2.

Número de divisões da aceleração	50	Número de Ordenadas Espectrais	20	
Espaçamento	Linear	<b>Ordenadas Espectrais</b>	Nº	T (s)
<b>Limite inferior da aceleração</b>	0,01		1	0,010
			2	0,025
			3	0,0286
			4	0,0333
			5	0,040
			6	0,050
			7	0,0625
			8	0,080
<b>Limite superior da aceleração</b>	0,2		9	0,10
			10	0,125
			11	0,15
			12	0,20
			13	0,25
			14	0,30
<b>Unidade de aceleração</b>	g		15	0,40
			16	0,50
			17	0,75
			18	1,0
			19	1,5
		20	2,0	

## 7.6. Parâmetros Globais

Os parâmetros globais adotados são os mesmos para todas as regiões. A distância máxima de integração considerada foi de 200 km e os parâmetros de discretização da malha da fonte sísmica foram alterados a fim de refinar os resultados sem aumentar muito o tempo de processamento. A Tabela 7-11 apresenta o resumo dos valores utilizados.

Tabela 7-11 - Resumo dos parâmetros globais para o processamento das regiões brasileiras

Distância máxima de integração (km)	Tamanho mínimo do triângulo (km)	Razão mínima Distância/Tamanho de triângulo	Janela temporal (anos)	Tempo de recorrência (anos)
200	5	5	50	475

## 7.7. Resultados

Após o processamento com R-CRISIS, obtiveram-se os mapas de ameaça sísmica de cada região analisada, apresentados nas Figuras 7-9 a 7-13, e também os EAU com os valores de aceleração espectral para cada ponto de interesse informado, apresentados nas Figuras 7-14 a 7-18.

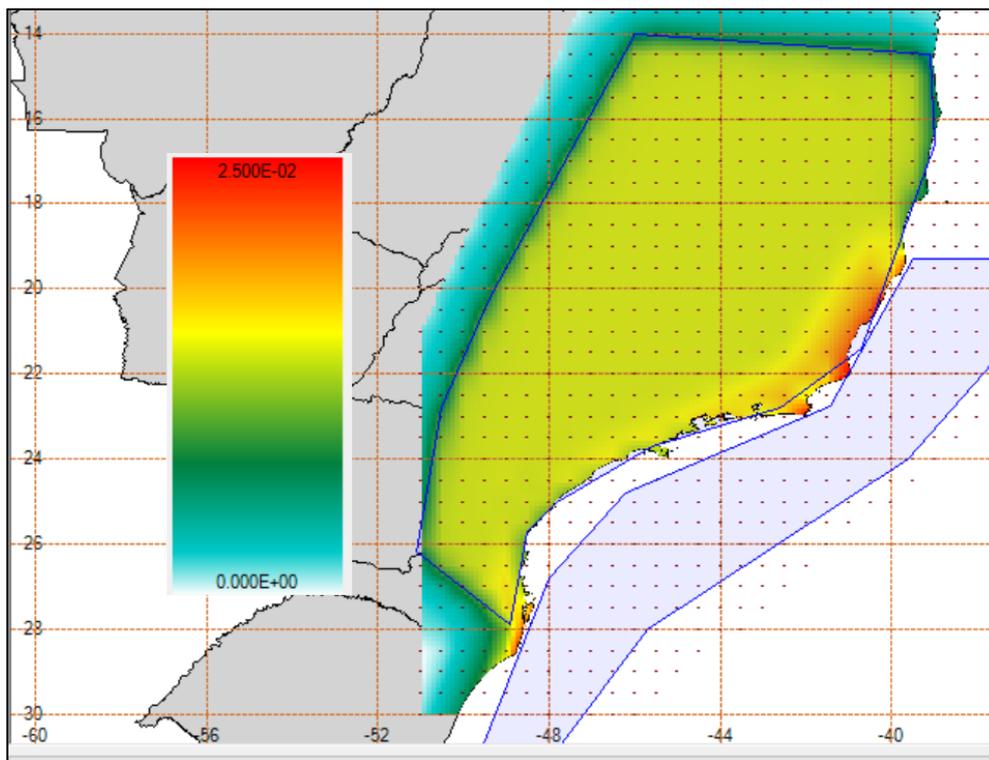


Figura 7-9 - Mapa de ameaça sísmica para o Sudeste para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

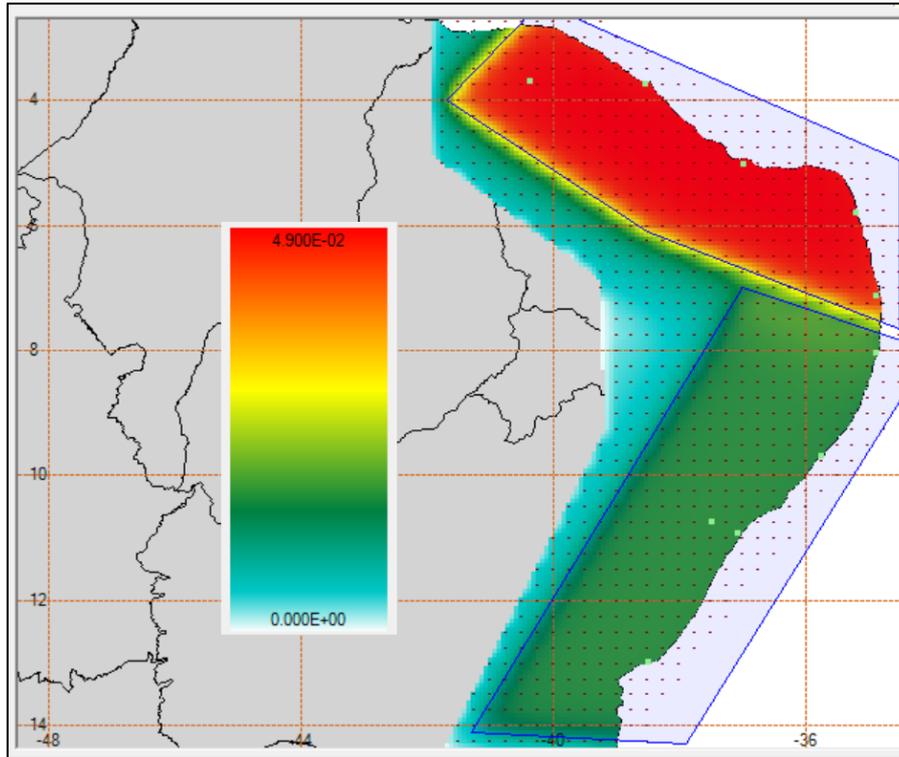


Figura 7-10 - Mapa de ameaça sísmica para o Nordeste para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

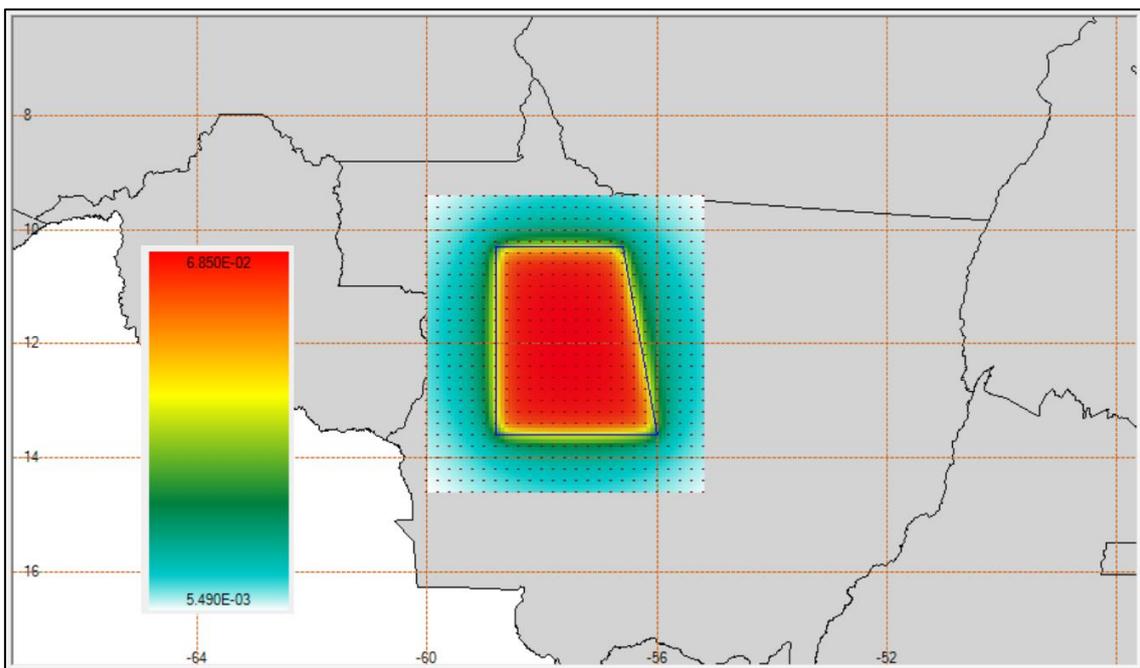


Figura 7-11 - Mapa de ameaça sísmica para o Mato Grosso para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

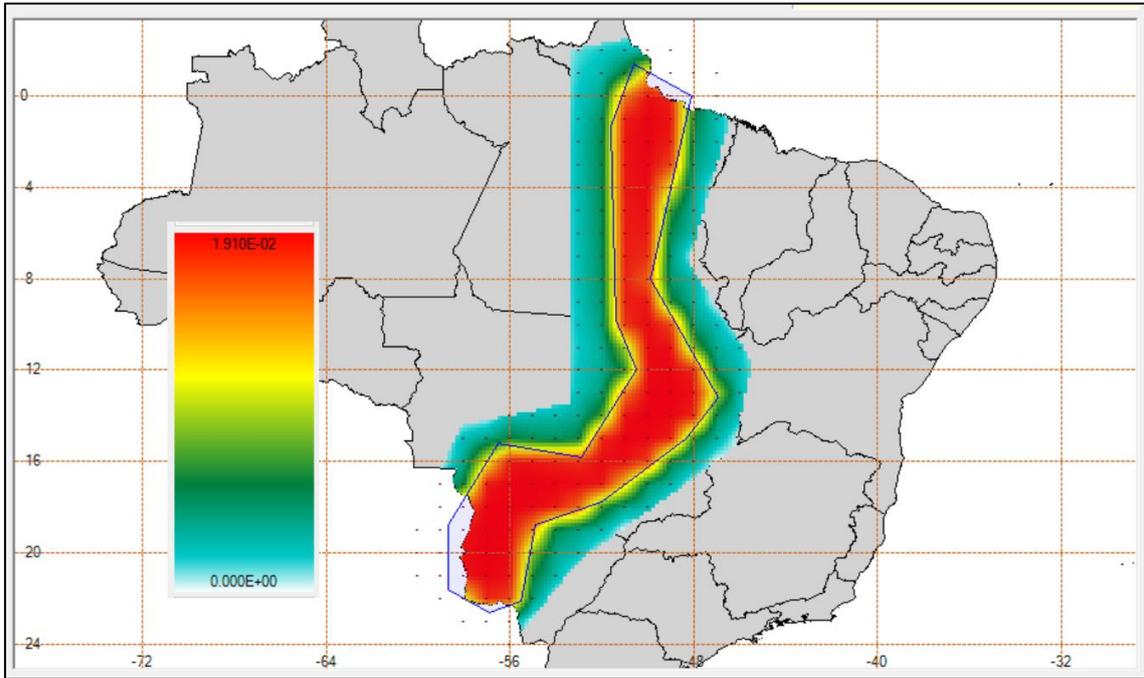


Figura 7-12 - Mapa de ameaça sísmica para o Centro-Oeste para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

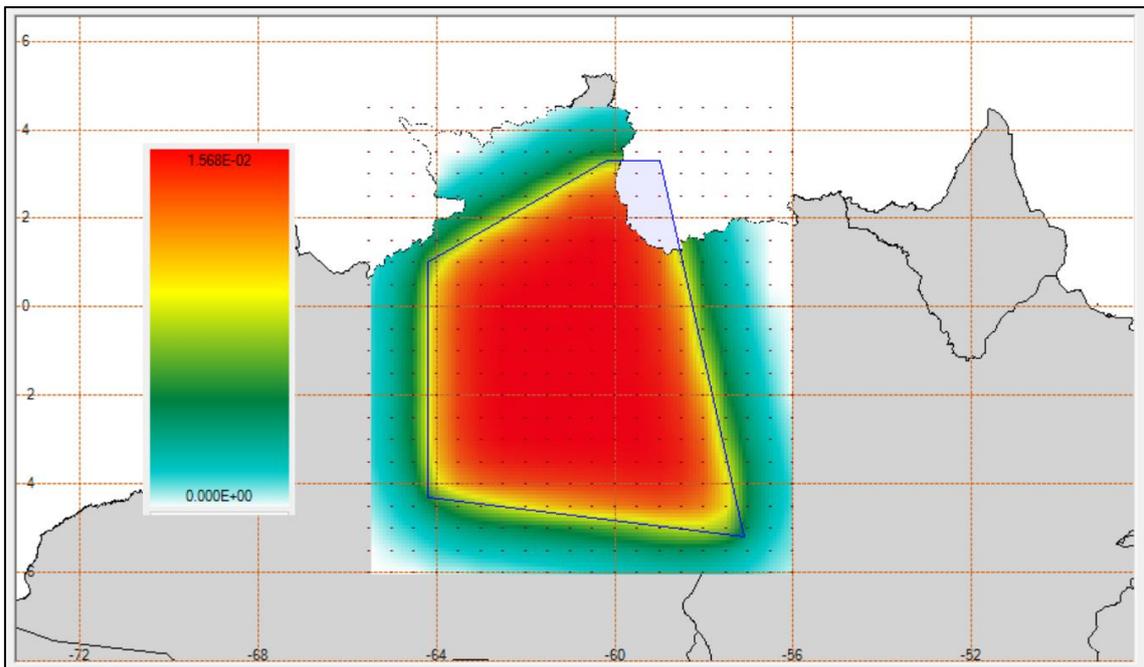


Figura 7-13 - Mapa de ameaça sísmica para o Amazonas para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

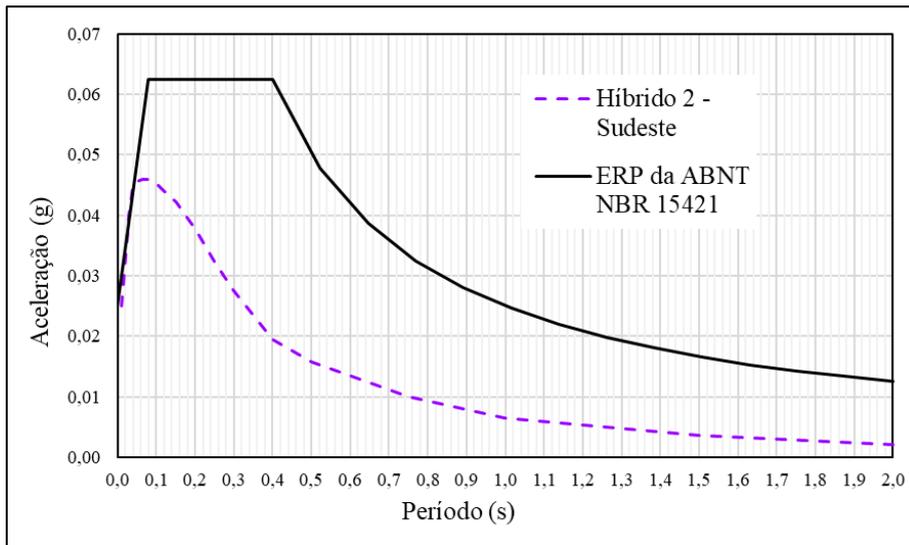


Figura 7-14 - EAU do Híbrido 2 para a Região Sudeste.

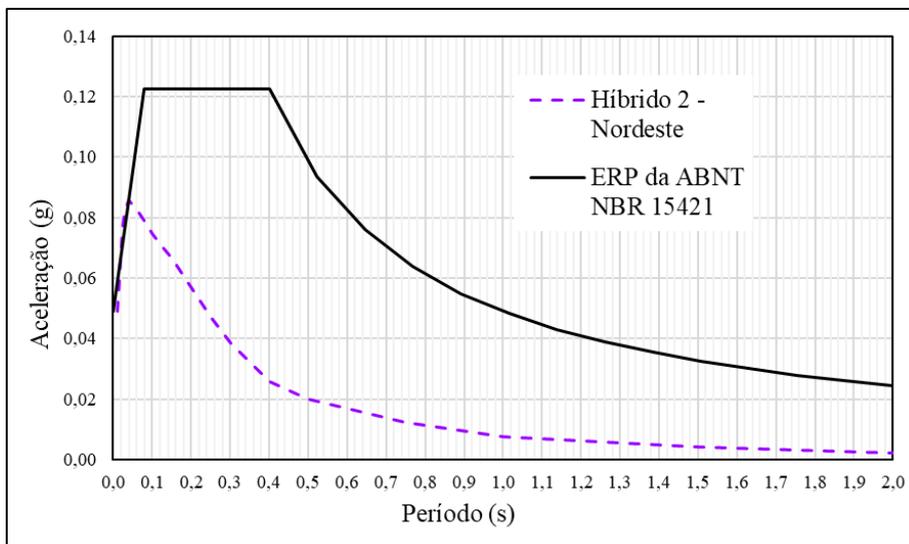


Figura 7-15 - EAU do Híbrido 2 para a Região Nordeste.

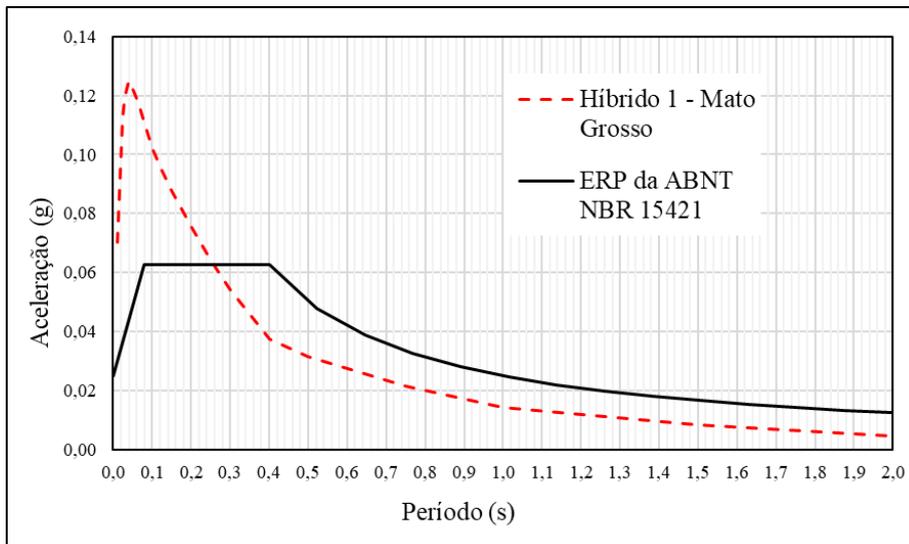


Figura 7-16 – EAU do Híbrido 1 para a Região do Mato Grosso.

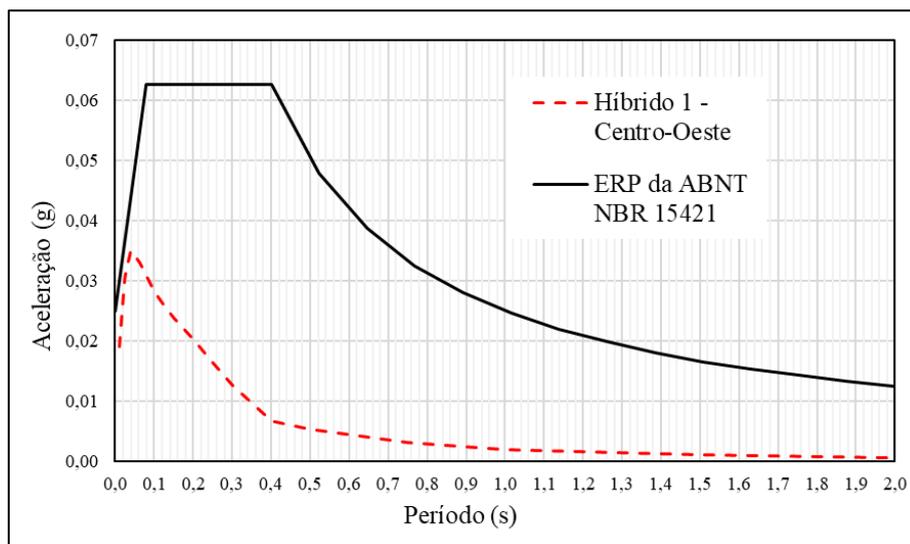


Figura 7-17 - EAU do Híbrido 1 para a Região Centro-Oeste.

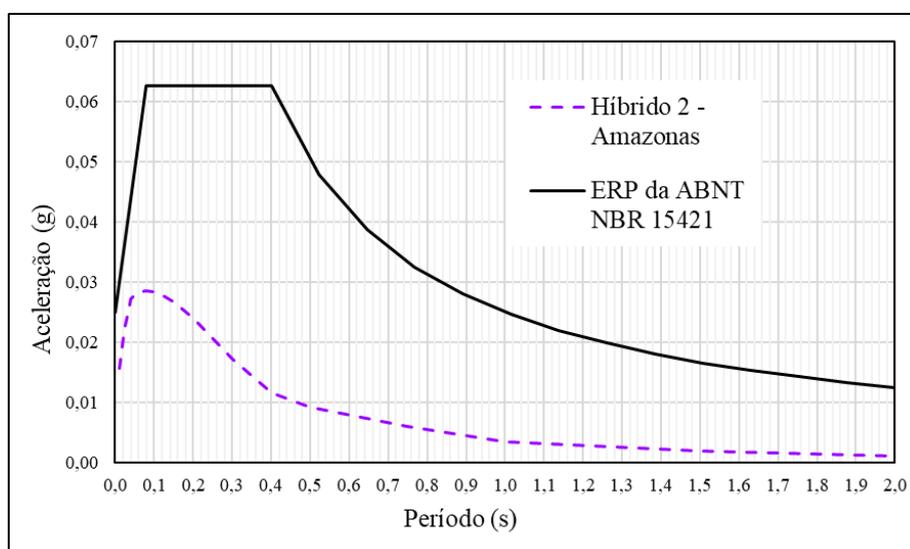


Figura 7-18 - EAU do Híbrido 2 para a região do Amazonas.

## 7.8. Estudo da sismicidade da região do Acre

A região do Acre não foi contemplada na análise probabilística do item anterior, pois os estudos de DOURADO (2014) não contemplaram a realidade sísmica da região. Os dados sísmicos considerados pelo autor, que constam no Catálogo Sísmico Brasileiro, não englobam alguns sismos profundos ocorridos na região que são mostrados, por exemplo, no catálogo do *International Seismological Center (ISC-GEM)*, considerado por PIRCHINER (2014). Além disso, a área-fonte escolhida não é a única que contribui para a sismicidade do local. De maneira semelhante ao que acontece com o Sudeste, onde a sismicidade da Plataforma Continental influi substancialmente nas acelerações previstas

para a porção em terra, os sismos ocorridos nos países vizinhos podem influir na sismicidade do território brasileiro.

Portanto, como alternativa à análise direta da sismicidade, buscou-se no sítio eletrônico de dados sísmicos do governo peruano (SERVIÇO WEB DE CONSULTAS, 2020), o EAU para um ponto da fronteira entre Brasil (Acre) e Peru com o valor de 0,15 g para o PGA. Este EAU pôde ser comparado, então, ao ERP da ABNT NBR 15421 (2006) para zona 4, como mostra a Figura 7-19.

Além do espectro, foram estudados também alguns mapas de ameaça sísmica atuais do território peruano. Na Figura 7-20 encontra-se o mapa mais atual do Instituto Geofísico do Peru (IGP, 2020) contido no trabalho de TAVERA *et al.* (2014). Na Figura 7-21, encontra-se o mapa apresentado no trabalho de RONCAL CASTRO (2017). Os mapas de ameaça sísmica apresentam a distribuição das acelerações para o PGA ( $T=0,0$  s) com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, em território peruano próximo à fronteira com o Brasil. O primeiro é medido em Gal ( $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$ ) com um intervalo de 20 Gal entre as linhas isossistas, o segundo é medido em g com intervalo de 0,02 g entre as linhas.

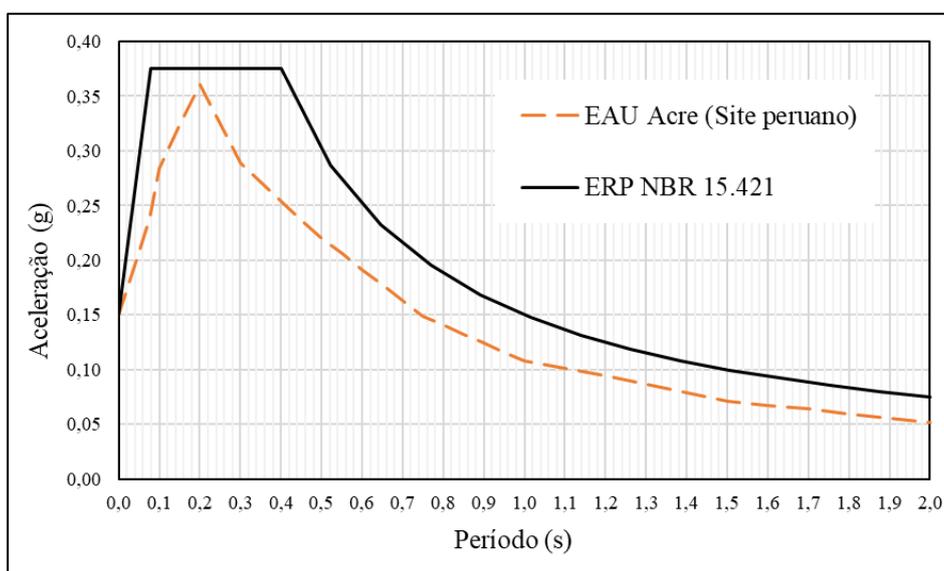


Figura 7-19 – Comparativo entre o ERP da NBR 15421 (2006) e o EAU do Acre.

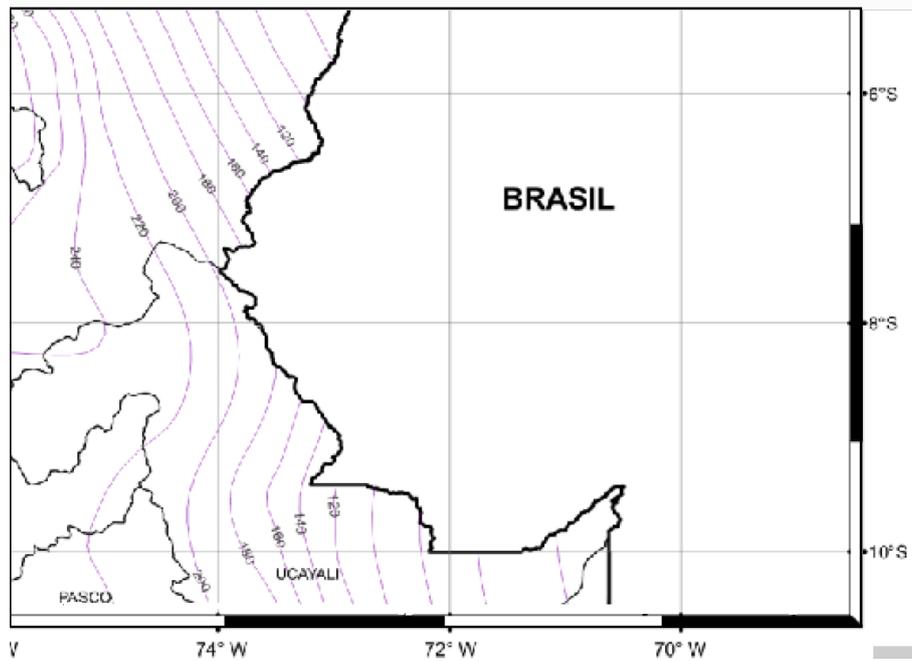


Figura 7-20 - Mapa de ameaça sísmica do IGP na fronteira entre Brasil e Peru, no PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, medido em Gal.

Fonte: Adaptado de TAVERA *et al.* (2014).

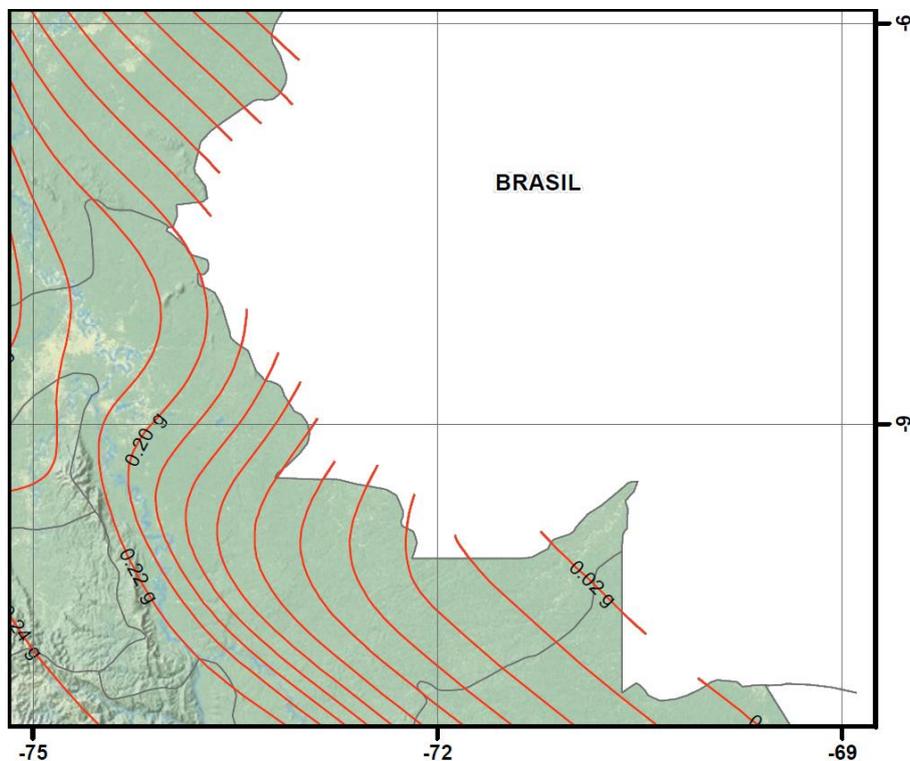


Figura 7-21 – Mapa de ameaça sísmica de RONCAL CASTRO (2017) para a fronteira entre Brasil e Peru, no PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, medido em g. Fonte: Adaptado de RONCAL CASTRO (2017).

## 7.9. Discussão dos Resultados

### 7.9.1. Discussão de resultados da Região Sudeste

Na Região Sudeste, consideraram-se duas áreas-fontes no processamento (Sul-Sudeste e Plataforma Continental) e o EAU obtido é relativo ao ponto em terra com a maior aceleração para o PGA ( $T=0,0$  s), chamado de Ponto Crítico em terra. Na Figura 7-9, nota-se que as regiões mais sísmicas do Sudeste são aquelas que recebem influência da área-fonte Plataforma Continental, destacadamente o litoral norte-fluminense e o litoral do Espírito Santo. Essas regiões, mesmo no caso mais desfavorável de aceleração para o PGA, não apresentam valores maiores que 0,025 g, limite da Zona 0. O restante da região Sudeste apresenta valores quase uniformes próximos a 0,015 g.

Na Figura 7-14, as acelerações ultrapassam os valores do ERP da Zona 0, na ordem de 0,0015 g, entre  $T=0,025$  s e  $T=0,04$  s, influenciados principalmente pela sismicidade da Plataforma Continental. O restante do espectro permanece bem comportado e abaixo do ERP de norma com uma diferença que vai de 0,043 g em  $T=0,4$  s a 0,01 g em  $T=2,0$  s.

A diferença das formas espectrais do EAU obtido para o ERP da norma indica uma necessidade de alteração no seu formato. Essa diferença é evidenciada em dois aspectos principais: os valores máximos ocorrem em  $T$  próximo a 0,04 s ao invés de  $T=0,08$ s da norma; a queda de valores após o máximo ocorre bem antes do  $T=0,4$  s de norma. Esta discordância será discutida posteriormente no capítulo 8.

### 7.9.2. Discussão de resultados da Região Nordeste

Na Região Nordeste, também se consideraram duas áreas-fontes no processamento (Nordeste 1 e Nordeste 2) e o EAU obtido é relativo ao ponto em terra com a maior aceleração para o PGA ( $T=0,0$  s), chamado de Ponto Crítico em terra. Na Figura 7-10, nota-se que a região mais sísmica da Região Nordeste se encontra dentro da área-fonte Nordeste 1 e engloba o norte do Ceará, o estado do Rio Grande do Norte e parte da Paraíba. A maior aceleração no PGA ( $T=0,0$  s) encontrada nesta região é 0,049 g, o que caracterizaria Zona 1. Entretanto, como pode ser observado na Figura 7-10, a área-fonte Nordeste 1 já apresenta valores maiores que 0,040 g em trechos próximos ao seu limite físico, isto é, apresenta valores maiores que os estabelecidos por norma nestes pontos. Tal fato, portanto, indica a necessidade de aumentar os valores de aceleração horizontal

previstos por norma nestes locais. Esta discordância será discutida posteriormente no Capítulo 8.

O restante da região Nordeste, contido na área-fonte Nordeste 2, apresenta valores quase uniformes próximos a 0,018 g, chegando ao máximo de 0,020 g perto da interface com a área-fonte Nordeste 1, da qual recebe influência.

Na Figura 7-15, vê-se que as acelerações ultrapassam os valores do ERP do limite superior da Zona 1, na ordem de 0,005 g, entre  $T=0,025$  s e  $T=0,04$  s. O restante do espectro permanece bem comportado e abaixo do ERP de norma com uma diferença que vai de 0,097 g em  $T=0,4$  s a 0,010 g em  $T=2,0$  s.

Apesar dos valores de aceleração espectral dos resultados estarem condizentes com os previstos em norma observa-se, assim como na região Sudeste, uma diferença de forma que indica uma alteração no seu formato, o que também será discutido no Capítulo 8.

### 7.9.3. *Discussão de resultados do Mato Grosso*

Na região do Mato Grosso, foi considerada apenas uma área-fonte e o EAU obtido é relativo ao ponto no centro desta área, chamado de Ponto Crítico. Os valores apresentados na Figura 7-11 são os resultados mais discrepantes em relação à norma obtidos neste trabalho. Atualmente, a região é considerada Zona 0, entretanto o valor máximo encontrado é 0,069 g, o que caracteriza Zona 2. Nota-se ainda na Figura 7-11 que a Zona 2 se estende até quase o limite da área-fonte considerada e que os valores de aceleração caem rapidamente após este limite para valores característicos de Zona 0.

Na Figura 7-16, as acelerações ultrapassam os valores do ERP do limite superior da Zona 1, na ordem de 0,060 g, entre  $T=0,025$  s e  $T=0,04$  s. O restante do espectro permanece bem comportado e abaixo do ERP de norma com uma diferença que vai de 0,134 g em  $T=0,4$  s a 0,006 g em  $T=2,0$  s.

Além da mudança do zoneamento sísmico, a mesma diferença de forma espectral, observada nas duas regiões anteriores, também pôde ser observada nesta região e, portanto, também indica uma alteração no seu formato. As duas mudanças serão discutidas posteriormente no Capítulo 8.

#### 7.9.4. *Discussão de resultados da região Centro-Oeste e do Amazonas*

Nas regiões do Centro-Oeste e do Amazonas foi considerada apenas uma área-fonte para cada e os EAU são relativos aos seus respectivos pontos críticos. Tanto os mapas de ameaça sísmica (Figuras 7-12 e 7-13) quanto os EAU (Figuras 7-17 e 7-18) se mantiveram dentro do limite da Zona 0.

O EAU da região Centro-Oeste é mais esbelto e com valores um pouco menores, em oposição à uma forma mais alargada e com valores maiores da região do Amazonas. Essa diferença pode ser justificada pela combinação da sismicidade (relação de Gutenberg-Richter) e forma da área-fonte em cada área. A sismicidade geral da região Centro-Oeste é maior ( $\lambda_{\min}=2,03$ ), mas existe uma prevalência de terremotos de menor magnitude ( $b=1,09$ ). Por outro lado, a região do Amazonas possui uma sismicidade geral menor ( $\lambda_{\min}=0,38$ ), mas com uma maior regularidade entre as quantidades de terremotos de baixa e média magnitudes ( $b=0,65$ ). Aliado a isso, a área da região Centro-Oeste é muito maior que a do Amazonas o que resulta em uma sismicidade mais “diluída” em contraste a uma mais “concentrada” do segundo.

Apesar de apresentarem valores sempre menores que os ERP da norma, observou-se também nesta, da mesma forma que em todas as regiões anteriores, que há uma diferença de forma entre os espectros. Tal fato indica uma necessidade de alteração no formato atual, a qual será discutida posteriormente no capítulo 8.

#### 7.9.5. *Discussão sobre o Estudo da região do Acre*

O EAU mostrado na Figura 7-19 se comporta bem e permanece sempre abaixo do ERP de norma e, em contraste com o que foi observado nas demais regiões analisadas, o ERP da norma se adequa bem ao EAU para a localidade. Seu formato se diferencia dos demais EAU encontrados na análise, com pico um pouco mais tarde ( $T=0,2$  s) e valores altos em toda sua extensão. Este tipo de espectro corresponde a regiões de alta sismicidade como é a região andina.

Nas Figuras 7-20 e 7-21 observa-se que as análises peruanas chegam a acelerações perto de 0,20 g na região mais a oeste do Acre, que decrescem na direção leste, chegando aos valores correspondentes à Zona 0 nas proximidades da cidade de Rio Branco. Os valores adotados atualmente pelo mapa de ameaça sísmica da ABNT NBR 15421 (2006)

em geral são conservadores, quando comparados aos mapas consultados, à exceção de um pequeno trecho a oeste do Acre, onde a norma adota o valor constante de 0,15 g.

#### *7.9.6. Observações gerais sobre os resultados*

Vale ressaltar que a escolha dos pontos críticos, como os casos mais desfavoráveis, não implica em que essas localizações sejam de fato as mais afetadas em caso de terremoto. Para uma melhor regionalização das acelerações possíveis, o método utilizado exige uma quantidade maior de áreas-fontes, como feito por exemplo por RONCAL CASTRO (2017) em seu trabalho. Ao usar somente uma ou duas áreas-fontes, essa regionalização fica deficiente e, conseqüentemente, os pontos escolhidos para a análise podem ser entendidos, na verdade, como o cenário mais crítico possível nas regiões consideradas.

No Capítulo 12 - ANEXOS, além dos resultados obtidos já expostos neste capítulo, são mostradas as tabelas com seus respectivos EAU de outras cidades importantes do Sudeste e Nordeste, assim como de outros períodos de recorrência.

## 8. PROPOSTAS DE ATUALIZAÇÃO DA ABNT NBR 15421

Após a análise dos dados em cada região do Brasil e sua comparação ao zoneamento sísmico e ao Espectro de Resposta de Projeto (ERP) da ABNT NBR 15421 (2006), observaram-se três principais discrepâncias: zoneamento sísmico do Nordeste e da região do Mato Grosso e formato do ERP. A fim de sanar tais discrepâncias, propõem-se as alterações apresentadas a seguir.

### 8.1. Zoneamento sísmico da região Nordeste e do Mato Grosso

Como evidenciado no item 7.9.2, os valores de aceleração no PGA do Nordeste são muito próximos ao limite entre as Zonas 1 e 2, além disso há um comportamento de patamar mostrado na Figura 8-1 (a). Portanto, a proposta de mapeamento das acelerações para esta região consiste em aumentar o patamar, já existente, de aceleração constante de 0,05 g, conforme mostrado na Figura 8-1 (b).

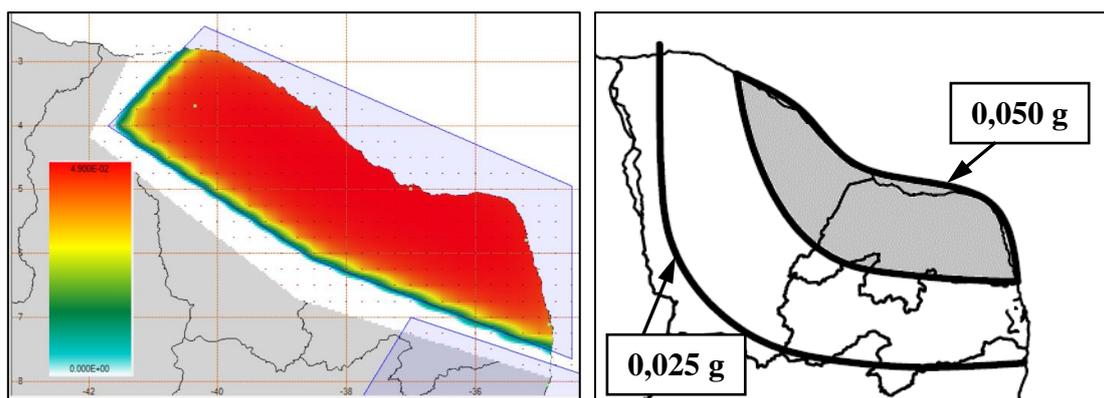


Figura 8-1 – (a) Detalhe do mapa de ameaça sísmica para região Nordeste 1 (b) Detalhe da proposta de mudança do zoneamento sísmico para o Nordeste, com patamar de 0,050 g em cinza.

Outrossim, os valores de aceleração no PGA da região do Mato Grosso, como evidenciado no item 7.9.3, correspondem à Zona 2. Portanto, a proposta de mapeamento das acelerações para esta região apresenta a Zona 2 centralizada na área-fonte correspondente, cercada pela Zona 1, a qual foi incorporada ao traçado já existente. Além disso, conforme mostrado na Figura 8-2 (b), apresenta-se um patamar central em 0,075 g seguindo a tendência mostrada na Figura 8-2 (a).

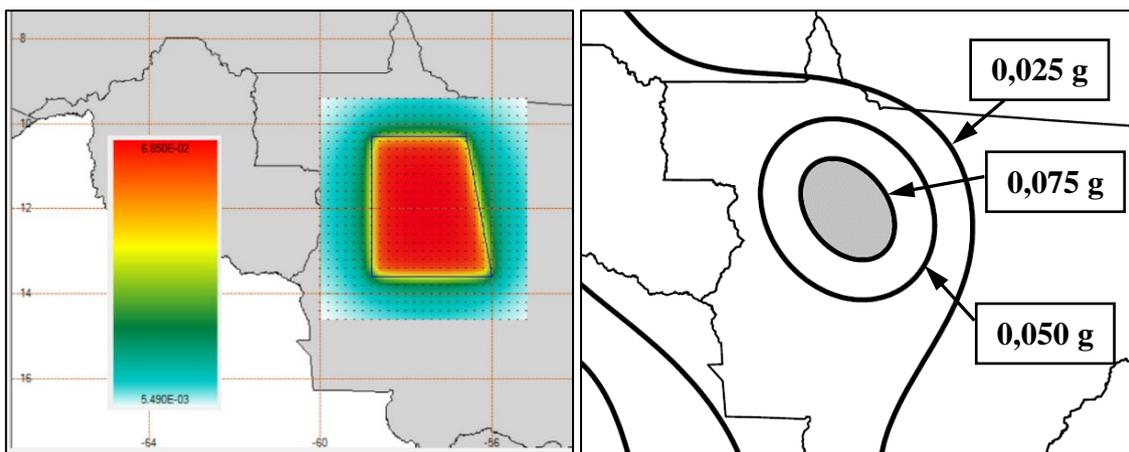


Figura 8-2 - (a) Detalhe do mapa de ameaça sísmica para o Mato Grosso (b) Detalhe da proposta de mudança do zoneamento sísmico para o Mato Grosso, com patamar de 0,075 g em cinza.

Por fim, a proposta de alteração do zoneamento de ameaça sísmica se resume na Figura 8-3 mostrada a seguir.

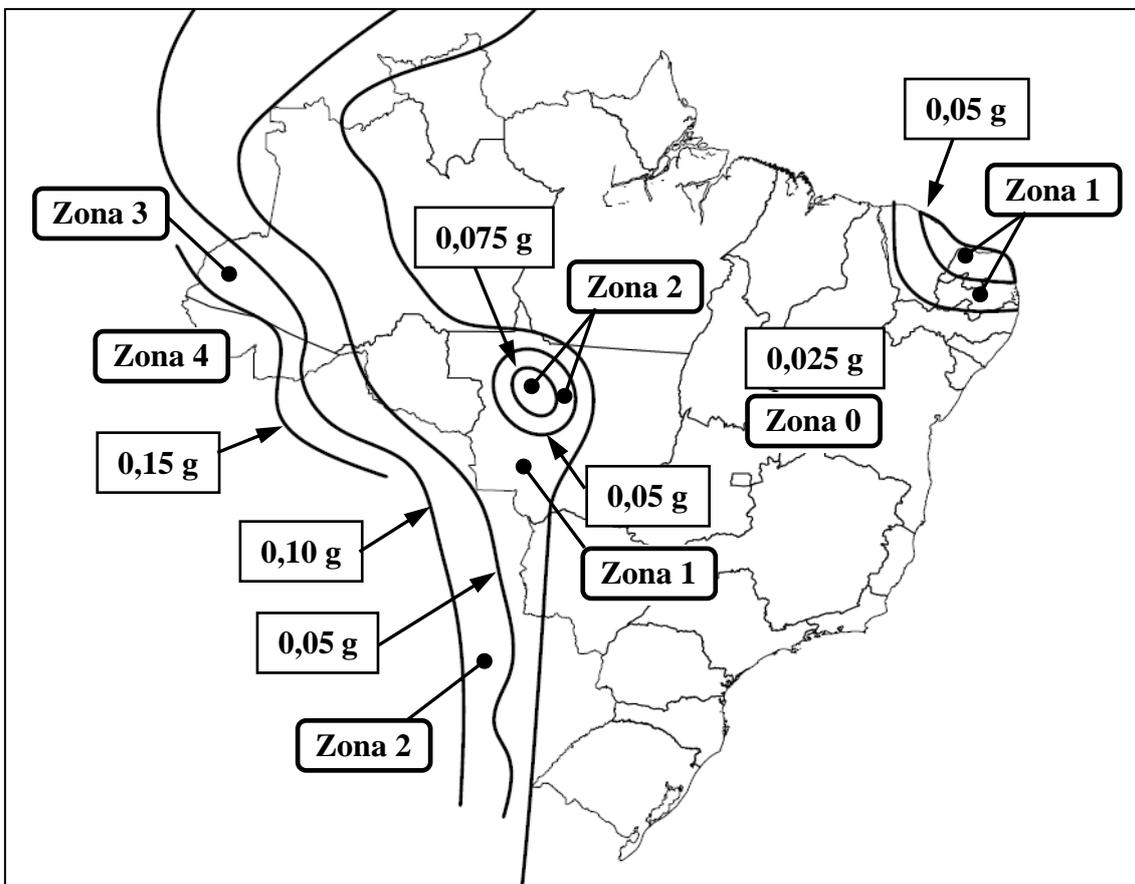


Figura 8-3 - Proposta de zoneamento sísmico brasileiro para a ABNT NBR 15421.

De forma a compatibilizar a ABNT NBR 15421 (2006) e o zoneamento aqui proposto, a Tabela 1 da norma deve ser mudada. Os valores de acelerações limítrofes pertencem ao mesmo tempo a duas zonas sísmicas diferentes, por isso propõem-se também o seguinte:

Tabela 8-1 - Proposta de alteração da Tabela 1 da ABNT NBR 15421 (2006).

Zona Sísmica	Valores de $a_g$
Zona 0	$a_g = 0,025 \text{ g}$
Zona 1	$0,025 \text{ g} < a_g \leq 0,05 \text{ g}$
Zona 2	$0,05 \text{ g} < a_g < 0,10 \text{ g}$
Zona 3	$0,10 \text{ g} \leq a_g < 0,15 \text{ g}$
Zona 4	$a_g = 0,15 \text{ g}$

## 8.2. Formato do Espectro de Resposta de Projeto

As diferenças notadas entre os Espectros de Ameaça Uniforme (EAU) obtidos e os ERP da ABNT NBR 15421 (2006) indicam uma inadequação do formato utilizado atualmente. O formato do ERP usado pela ABNT NBR 15421 (2006) é semelhante ao espectro Tipo 1 para solos Tipo A do EUROCÓDIGO 8 (2009), adequado a regiões de alta sismicidade. Como visto no capítulo anterior, os EAU característicos de regiões de baixa sismicidade tem formatos mais esbeltos com picos na região de baixos períodos. Desta forma, uma possível proposta de mudança do espectro seria adaptar o espectro Tipo 2 para solos Tipo A do EUROCÓDIGO 8 (2009), adequado a regiões de baixa sismicidade, à realidade sísmica brasileira.

A norma europeia estabelece que “se os sismos que mais contribuem para a ameaça definida para o local, no âmbito da avaliação probabilística da ameaça sísmica, tiverem uma magnitude das ondas de superfície,  $M_s$ , não superior a 5,5, recomenda-se a adoção do espectro do Tipo 2” (EUROCÓDIGO 8, 2009, p. 39).

Os gráficos de desagregação computados pelo R-CRISIS, mostrados na Figura 8-4 a seguir, demonstram que as regiões Sudeste, Nordeste e do Mato Grosso, atendem a esta condição imposta, ou seja, os terremotos de magnitude 5,5  $M_s$  ou menos são os que mais contribuem para a sismicidade dessas regiões.

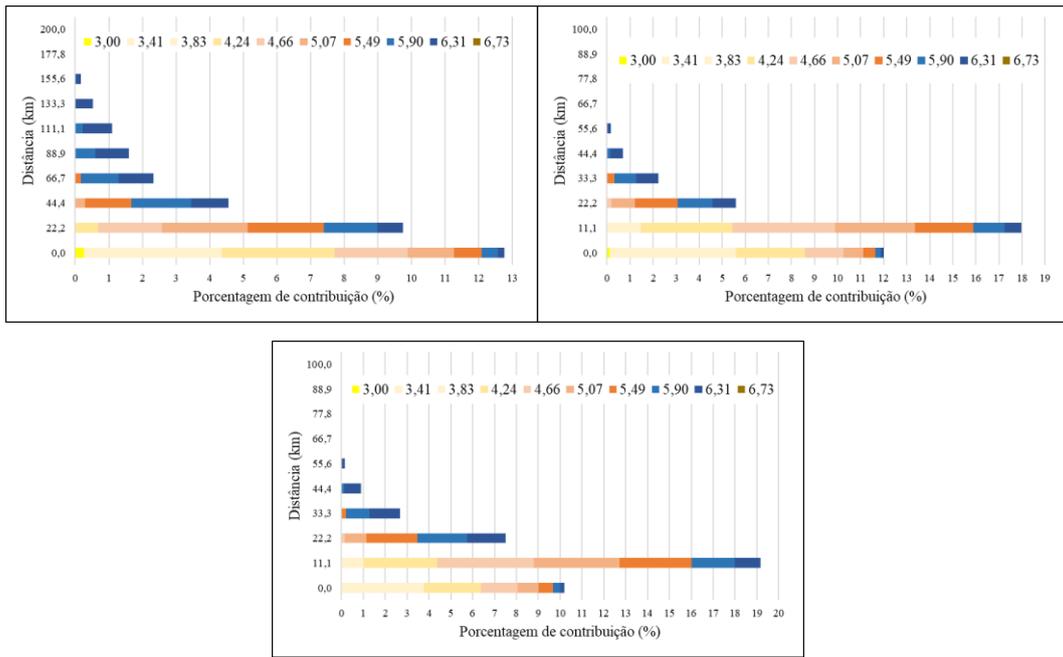
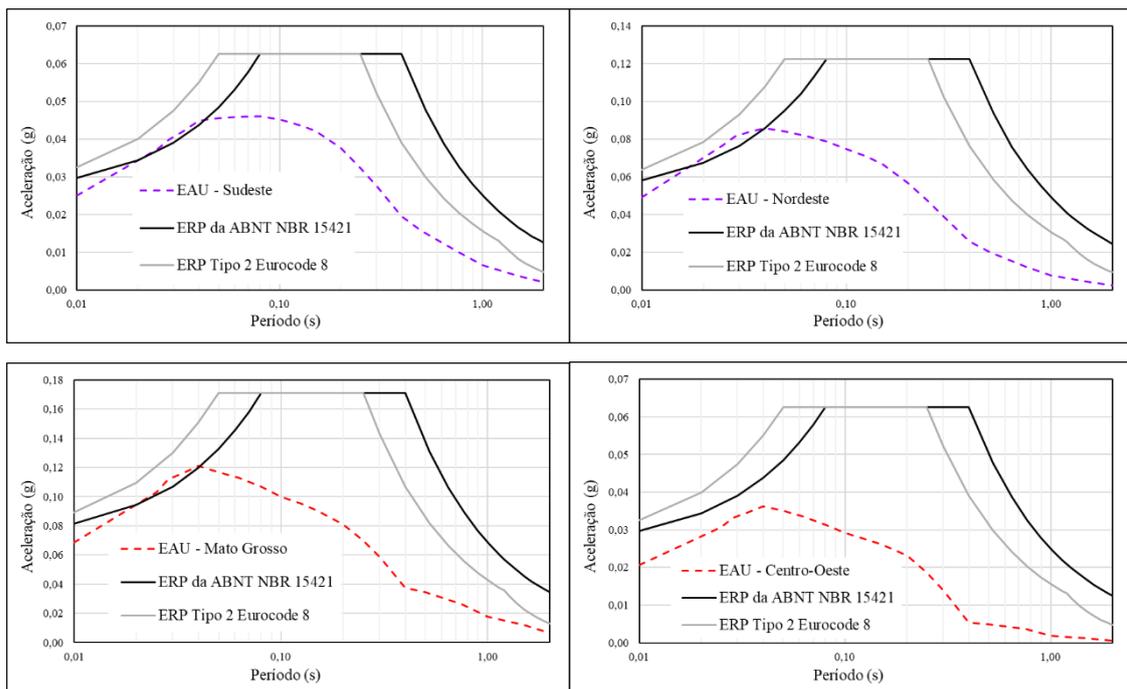


Figura 8-4 - Gráficos de desagregação de (a) Sudeste, (b) Nordeste e (c) Mato Grosso.

Nas Figura 8-4 (a) até (c), para uma dada distância, é informada a contribuição percentual de cada faixa de magnitude. Magnitudes maiores que 5,5 Ms estão em tons de azul escuro e menores em tons de laranja e amarelo.

Apesar de se enquadrar na condição citada acima, os EAU resultantes da análise não se ajustam perfeitamente ao ERP Tipo 2 do Eurocódigo 8. Como podemos observar nas Figuras 8-5 (a) a (e), os valores de aceleração espectral, em alguns casos, ultrapassam os valores da norma nos períodos próximos a  $T=0,03$  s.



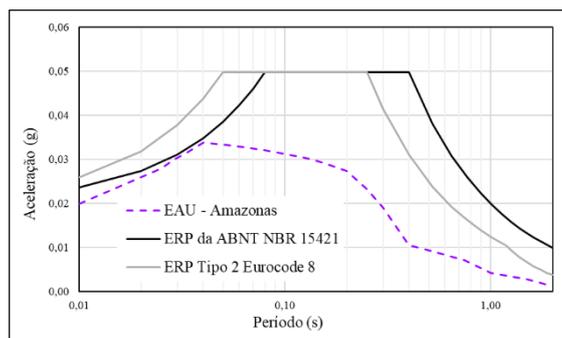


Figura 8-5 – Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421 (2006), o ERP Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8 (2009) e os EAU (a) do Sudeste, (b) do Nordeste, (c) do Mato Grosso, (d) do Centro-Oeste e (e) do Amazonas.

Além da comparação com os resultados obtidos, foi feita uma comparação com os EAU americanos de regiões que também atendem o critério citado do EUROCÓDIGO 8 para uso do ERP Tipo 2. Através de consulta ao sítio eletrônico do Serviço Geológico Estadonidense (USGS, 2020), foram verificados os gráficos de desagregação e extraídos os valores para construção do EAU, em duas regiões diferentes para dois valores de aceleração espectral no PGA (0,025g; 0,05g). Os espectros construídos foram comparados ao ERP da ABNT NBR 15421 e ao Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8.

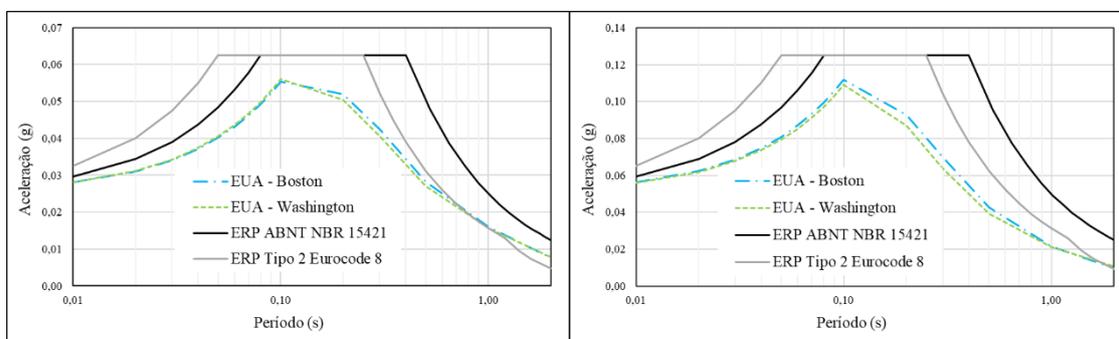


Figura 8-6 - Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421 (2006), o ERP Tipo 2 do Eurocódigo 8 (2009) e os EAU das proximidades de Boston e de Washington para aceleração horizontal no PGA de (a) 0,025g e (b) 0,050g.

Observa-se pelo gráfico que o ERP tipo 2 é compatível com os EAU americanos em boa parte dos valores, exceto na região de longos períodos. Apesar da norma americana, ASCE 07/16 (2016), considerar a existência do trecho de deslocamentos espectrais constantes, este só ocorre em períodos maiores que  $T=2,0$  s, diferentemente do EUROCÓDIGO 8 (2009) que adota  $T=1,2$  s.

A fim de se verificar a compatibilidade do ERP Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8 com as acelerações horizontais da região acreana, foram consultados os EAU da fronteira entre Brasil e Peru e da costa oeste americana, a qual guarda algumas semelhanças com os Andes por ser também uma região de alta sismicidade. Buscou-se no sítio eletrônico de dados sísmicos do governo peruano (SERVIÇO WEB DE CONSULTA, 2020), assim como no sítio eletrônico do Serviço Geológico Estadunidense (USGS, 2020) os EAU com o valor de 0,15 g para o PGA, os quais puderam ser comparados ao ERP da zona 4, como mostram as Figura 8-7 (a) e 8-7 (b).

Observa-se, portanto, que nas regiões que possuem sua sismicidade ligada aos Andes (região de subducção com terremotos profundos), o EAU apresenta um aspecto mais largo com o pico ocorrendo um pouco mais tarde ( $T=0,2$  s). Assim, o ERP atual da norma nesta região adequaria-se melhor do que o ERP Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8.

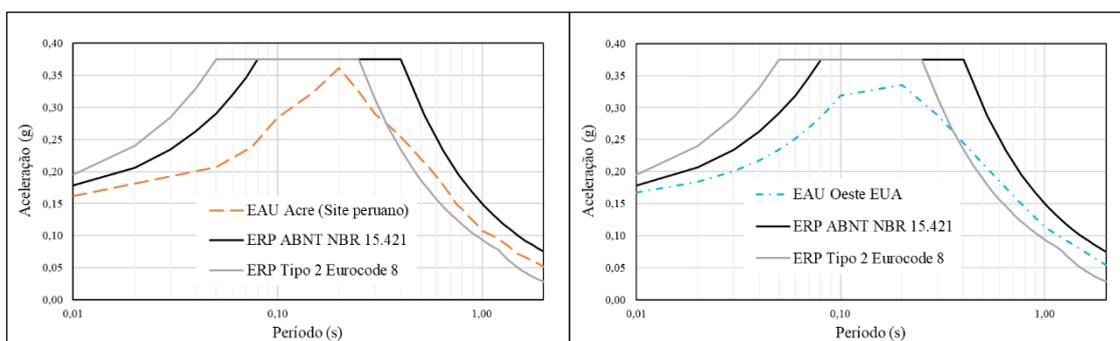


Figura 8-7 – Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421 (2006), o ERP Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8 (2009) e os (a) EAU do Acre consultado em site peruano e (b) EAU do oeste dos EUA.

Desta feita, a proposta de mudança do ERP da ABNT NBR 15421 (2006) consiste em se adotar o ERP Tipo 2 para terrenos tipo A do EUROCÓDIGO 8, com as seguintes alterações:

- 1) Antecipação do valor do período do início do patamar de acelerações constantes (chamado de  $T_B$  no EUROCÓDIGO 8) para  $T=0,04$  s. Como foi visto no capítulo 6, a maioria dos GMPM do tipo SCR estudados apresenta valores máximos em  $T=0,04$  s. Portanto, julgou-se importante que o ERP também apresentasse os valores máximos para esta abscissa, mesmo que o valor adotado pelo ERP Tipo 2 em  $T=0,05$  s já fosse suficiente para cobrir os EAU obtidos.

- 2) Aumento do valor de período do final do patamar de aceleração constante (chamado de  $T_C$  no EUROCÓDIGO 8) para  $T=0,30$  s. Partindo da premissa que será definido apenas um ERP para todo o território nacional, o mesmo deve atender às regiões de baixa sismicidade e também às regiões de média e alta sismicidade, como aquelas próximas aos Andes. Todavia, como visto anteriormente neste capítulo, o espectro Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8 não se adequa ao EAU característico do segundo caso, no trecho de longos períodos. Portanto, adotou-se um valor um pouco maior para o período de fim do patamar a fim de se considerar a segurança das estruturas nestas regiões (Acre e adjacências), porém menor que o valor atual ( $T=0,40$  s) visando uma consequente economia das estruturas nas demais regiões brasileiras alheias à influência da sismicidade andina.
- 3) Definição do valor de período do início do trecho de deslocamentos espectrais constantes (chamado de  $T_D$  no EUROCÓDIGO 8) para  $T=2,0$  s. Não foi possível, através dos estudos realizados, chegar a uma conclusão sobre o valor do período para o território brasileiro onde este trecho se inicia, mas observou-se em vários comparativos feitos neste capítulo que o valor do Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8 de  $T=1,2$  s não é conservador. Assim, na carência de mais informações sobre o assunto, optou-se pelo maior valor disponível nos Quadros 3.2 e 3.3 do EUROCÓDIGO 8 para  $T_D$ .

A seguir, apresenta-se a formulação proposta com as alterações citadas, já adaptada para a versão brasileira, juntamente com o espectro correspondente na Figura 8-8.

$$\begin{aligned}
 S_a(T) &= a_{gs0} \left( 37,5 \cdot T \cdot \frac{C_a}{C_v} + 1 \right), & \text{para } 0 \leq T < \frac{C_v}{C_a} \cdot 0,04 \\
 S_a(T) &= 2,5 \cdot a_{gs0}, & \text{para } \frac{C_v}{C_a} \cdot 0,04 \leq T < \frac{C_v}{C_a} \cdot 0,30 \\
 S_a(T) &= 0,75 \cdot (a_{gs1}/T), & \text{para } \frac{C_v}{C_a} \cdot 0,30 \leq T < \frac{C_v}{C_a} \cdot 2,0 \\
 S_a(T) &= 1,50 \cdot \frac{C_v}{C_a} \cdot (a_{gs1}/T^2), & \text{para } T \geq \frac{C_v}{C_a} \cdot 2,0
 \end{aligned}$$

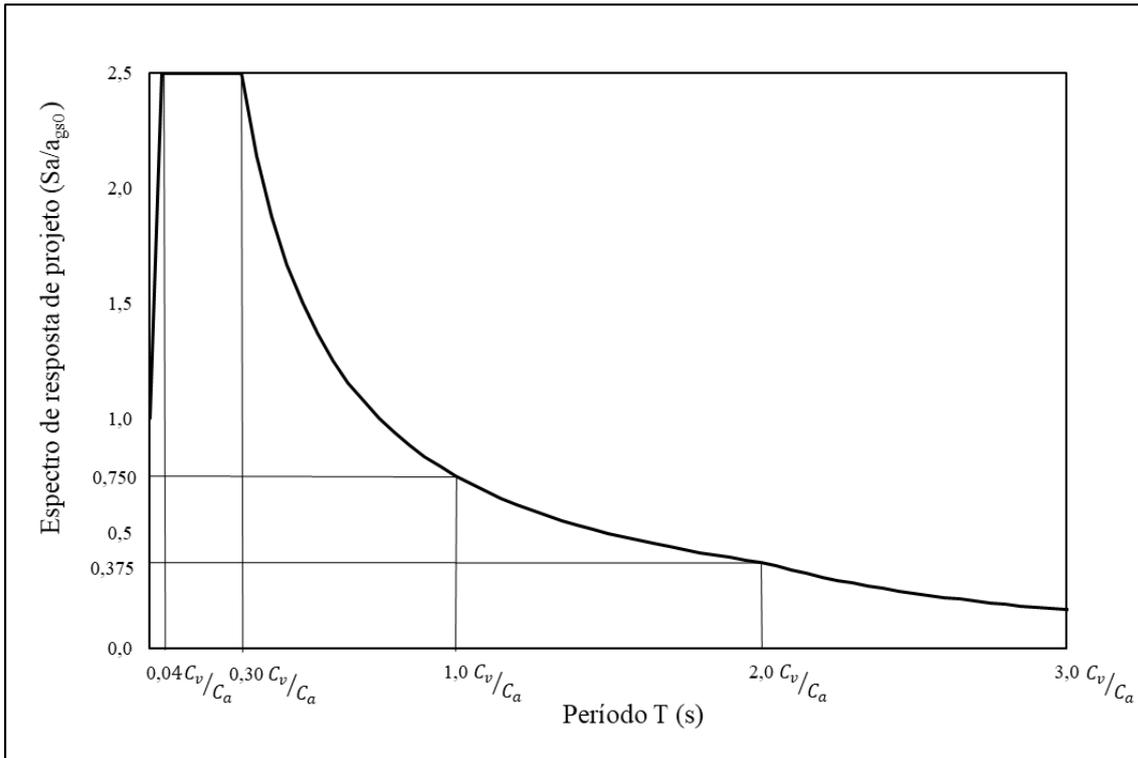
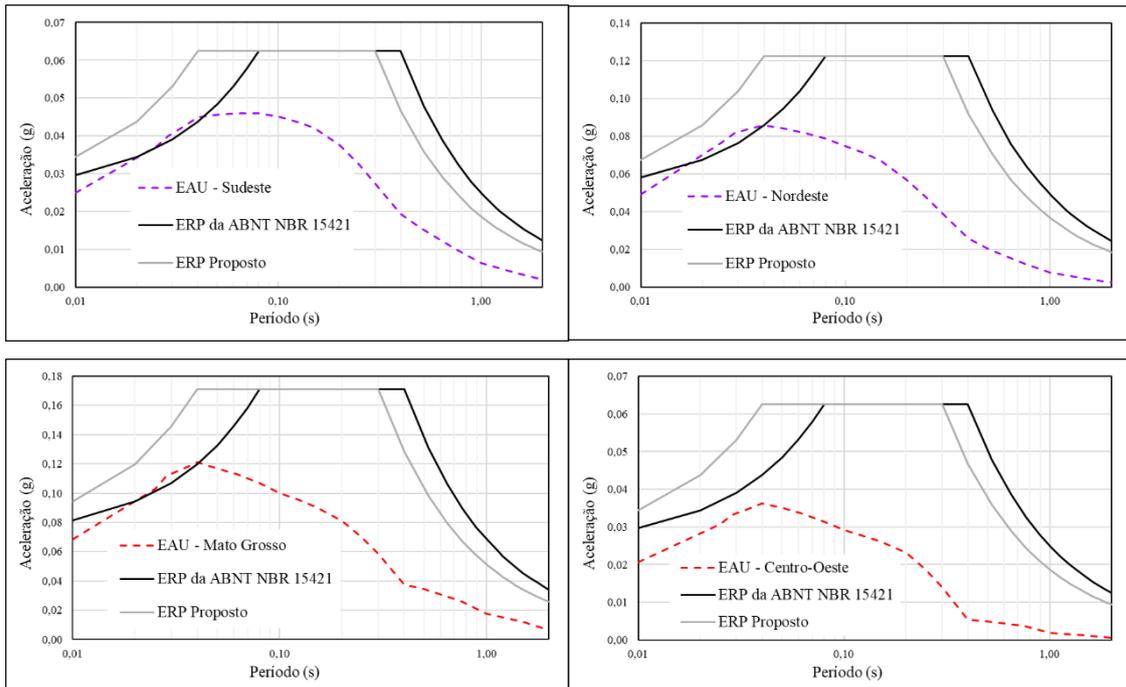


Figura 8-8 - Proposta de Espectro de Resposta de Projeto para ABNT NBR 15421.

A fim de comparar o ERP atual e o proposto, foram traçados os EAU de cada região junto aos ERP construídos a partir do valor da aceleração espectral no PGA. Nas Figuras 8-9 (a) a (f) apresenta-se esta comparação adotando-se a escala logarítmica no eixo dos períodos para melhor visualização do trecho inicial de  $T=0,01$  s a  $T=0,10$  s.



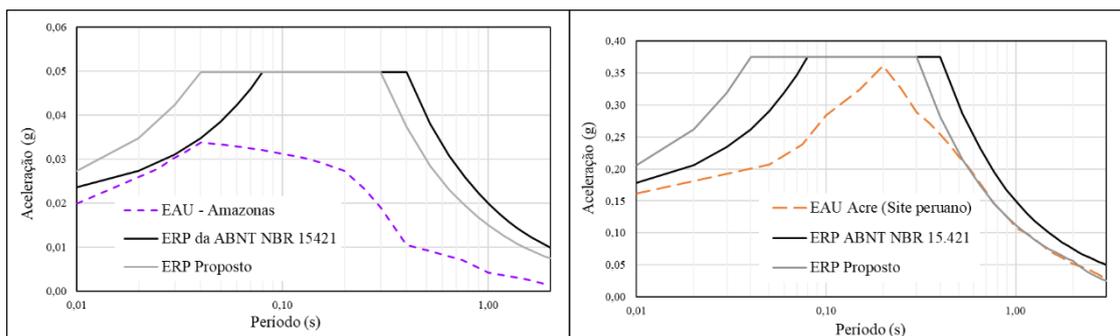


Figura 8-9 - Comparativo entre o ERP da ABNT NBR 15421, o ERP proposto e o EAU (a) do Sudeste, (b) do Nordeste, (c) do Mato Grosso, (d) do Centro-Oeste, (e) do Amazonas e (f) do Acre.

A Tabela 8-2 a seguir apresenta o comparativo da área residual entre o EAU obtidos na análise para cada região e os dois ERP, o atual da ABNT NBR 154121 (2006) e proposto na Figura 8-8. A área residual pode ser entendida como a área entre as duas curvas comparadas. Assim, no caso estudado, uma menor área residual pode indicar uma melhor conformação entre os ERP e os EAU.

Tabela 8-2 – Comparativo entre as áreas residuais do ERP ABNT NBR 15421 (2006) e do ERP Proposto

	Área Residual Sudeste	Área Residual Nordeste	Área Residual Mato Grosso	Área Residual Centro-Oeste	Área Residual Amazonas	Área Residual Acre
ERP NBR 15421	0,0390	0,0897	0,1151	0,0519	0,0470	0,0924
ERP Proposto	0,0321	0,0771	0,0957	0,0459	0,0406	0,0326
diferença %	-18%	-14%	-17%	-11%	-14%	-65%

As Tabelas 8-3 e 8-4 a seguir apresentam, respectivamente, o comparativo das médias e desvios padrões dos resíduos entre os EAU obtidos na análise para cada região e os dois ERP, o atual da ABNT NBR 154121 (2006) e proposto na Figura 8-8. Os resíduos são calculados como a diferença entre as acelerações espectrais em cada período e a média e o desvio padrão são referentes a esses valores. Uma menor média dos resíduos indica uma maior proximidade entre os gráficos e um menor desvio padrão

indica uma melhor distribuição dos resíduos ao longo do espectro, ou seja, uma tendência de homogeneização do valor dos resíduos.

As tabelas mostram em números o que pode ser observado nas Figuras 8-9 (a) a (e), um ajuste melhor dos ERP proposto em relação aos EAU obtidos na análise. A exceção a essa tendência é o caso do Acre, apresentado na Figura 8-9 (f), onde o ajuste, além de aumentar os resíduos no primeiro trecho, quase os levou a zero no trecho final.

Tabela 8-3 - Comparativo entre as médias dos resíduos do ERP da ABNT NBR 15421 (2006) e do ERP Proposto

	Média Residual Sudeste	Média Residual Nordeste	Média Residual Mato Grosso	Média Residual Centro-Oeste	Média Residual Amazonas	Média Residual Acre
ERP NBR 15421	0,0157	0,0370	0,0488	0,0234	0,0219	0,0510
ERP Proposto	0,0147	0,0351	0,0461	0,0225	0,0209	0,0451
diferença %	-6%	-5%	-5%	-4%	-4%	-11%

Tabela 8-4 - Comparativo entre os desvios padrões dos resíduos do ERP ABNT NBR 15421 (2006) e do ERP Proposto

	Desvio Padrão Residual Sudeste	Desvio Padrão Residual Nordeste	Desvio Padrão Residual Mato Grosso	Desvio Padrão Residual Centro-Oeste	Desvio Padrão Residual Amazonas	Desvio Padrão Residual Acre
ERP NBR 15421	0,0110	0,0262	0,0355	0,0137	0,0118	0,0311
ERP Proposto	0,0071	0,0189	0,0271	0,0114	0,0105	0,0593
diferença %	-35%	-28%	-24%	-17%	-11%	91%

Ao modificar o ERP para um semelhante ao Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8, principalmente dois trechos tiveram seus resíduos modificados. Com a exceção do Acre, em todas as regiões, no trecho de  $T=0,0$  s até o patamar de aceleração espectral constante, os resíduos aumentaram, e no trecho após este patamar, os resíduos diminuíram. Tal fato explica o pequeno decréscimo percentual da média em comparação a um substancial decréscimo do desvio padrão, além de explicar também o decréscimo da área, pois o

trecho onde houve diminuição dos resíduos é mais extenso. Observa-se através desses resultados, portanto, que o ajuste proposto vai no sentido de otimizar o ERP de norma sem perder em segurança.

Na região do Acre, o ERP proposto ficou menos ajustado ao EAU consultado no sítio eletrônico do Instituto Geológico Peruano (SERVIÇO WEB DE CONSULTA, 2020). Isto está evidenciado na grande diminuição da área residual aliada ao grande aumento do desvio padrão, indicando assim uma assimetria na distribuição dos resíduos. Tal fato já era esperado, pois, como explicado anteriormente, optou-se nesta proposta por priorizar a maior parte do território brasileiro, a qual apresenta característica de baixa sismicidade, e apenas cobrir minimamente as acelerações da região acreana.

## 9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

### 9.1. Conclusões

Esta Dissertação teve como objetivo principal o de contribuir para o conhecimento na área de análise da ameaça sísmica no Brasil. Em seu princípio, foram introduzidos conceitos básicos de sismologia e de análise probabilística de ameaça sísmica, seguidos de uma exposição sobre o programa R-CRISIS.

Através dessa ferramenta computacional, foi possível reprocessar os dados de entrada dos trabalhos de SILVA (2009) e SILVA (2018) e verificar os seus Espectros de Ameaça Uniforme (EAU). Observou-se que os valores de aceleração horizontal gerados pelo R-CRISIS foram, em geral, maiores do que os encontrados originalmente por estes autores. Esta discordância justifica-se, principalmente, pela abordagem probabilística mais completa do programa, onde se considera, por exemplo, as incertezas de diferentes naturezas usadas nos modelos probabilísticos.

Posteriormente, foram realizados estudos paramétricos, a fim de se entender melhor a contribuição dos vários parâmetros do R-CRISIS nos resultados e foi possível conceber dois GMPM híbridos para o território brasileiro. Um, construído somente com GMPM do tipo *Stable Continental Region* e outro com GMPM incluindo o tipo *Active Shallow Crustal Region*.

Em seguida, executou-se a análise probabilística de ameaça sísmica no Brasil, lançando mão dos dados utilizados por DOURADO (2014), dos parâmetros estudados e dos GMPM híbridos concebidos anteriormente. Obteve-se como resultado um mapa de ameaça sísmica e um EAU para cada região considerada. Em especial, os resultados da região Sudeste concordaram bem com os resultados anteriores de DE ALMEIDA *et al.* (2019). A região do Acre foi estudada à parte, através de uma análise comparativa, pois não havia dados disponíveis para proceder à sua análise pelo R-CRISIS.

Os resultados encontrados apontaram três principais discrepâncias, quando comparados à ABNT NBR 15421 (2006): zoneamento sísmico do Nordeste e da região do Mato Grosso e formato do Espectro de Resposta de Projeto (ERP).

Por fim, foram apresentadas as propostas de alteração no mapa sísmico brasileiro: aumentando para 0,05 g o valor de aceleração no PGA, em algumas regiões do Nordeste e introduzindo uma nova região sísmica relevante no norte do Mato Grosso, com acelerações no PGA até 0,075 g.

Outra proposta apresentada neste trabalho é a mudança do ERP para um formato característico de região de baixa sismicidade, semelhante ao Tipo 2 para terrenos tipo A do EUROCÓDIGO 8, com adaptações baseadas nos resultados encontrados. O melhor ajuste da proposta de mudança, quando comparado ao ERP atual de norma, é comprovado num derradeiro estudo de resíduos.

## 9.2. Sugestões de Trabalhos Futuros

Tendo em vista os desafios enfrentados e as limitações deste trabalho, sugerem-se alguns temas que podem ser abordados em trabalhos futuros:

- 1) Análise Probabilística de Ameaça Sísmica (APAS) do Brasil mais completa, isto é, a qual utilize uma árvore lógica que considere, além de diferentes GMPM abordados neste trabalho, também diferentes modelos de zoneamento sísmico, diferentes homogeneizações das escalas de magnitudes, padronização da magnitude mínima e a adoção de fatores de transposição de modelos de solo tipo Rocha Sã (*Hard Rock*) para tipo Rocha (*Rock*). Este último ponto ainda não foi abordado nas APAS anteriores registradas na literatura brasileira, porém ele se mostrou de grande importância na elaboração de mapas de ameaça sísmica internacionais, como mostram BOORE e CAMPBELL (2017) e DROUET *et al.* (2010). Uma vez que os mapas normativos adotam como padrão as acelerações esperadas para um solo tipo Rocha, caracterizada por uma VS30 = 760 m/s, e os GMPM adotados nas análises, em geral, preveem acelerações para solos tipo Rocha Sã, caracterizado por uma VS30 > 1500 m/s, esse tipo de ajuste se faz necessário;
- 2) APAS específica da região do Acre e oeste amazônico. Idealmente, pode-se adotar o roteiro seguido por RONCAL CASTRO (2017) e segregar as áreas-fontes por profundidade dos sismos, assim como, adotar GMPM distintos para os dois casos. Além disso, deve-se colocar a região estudada dentro do contexto sísmológico que se avizinha, isto é, deve-se considerar a influência sísmica das

regiões próximas na sismicidade desta parte do território brasileiro. Tal análise pode ser feita em parceria com pesquisadores peruanos;

- 3) Estudo comparativo dos esforços obtidos em um edifício típico ou ponte típica, submetidos a sismos baseados nos ERP aqui citados: o atual de norma, o proposto e o Tipo 2 do EUROCÓDIGO 8;
- 4) Análise de estruturas marítimas e portuárias submetidas às cargas sísmicas características de cada região costeira aqui estudada, como o Sudeste e o Nordeste.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AGUILAR, Z.; RONCAL, M.; PIEDRA, R., *Probabilistic Seismic Hazard Assessment in the Peruvian Territory*, In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING (WCEE), 16, Santiago, Chile, 2017.

AKKAR, S.; BOMMER, J. J., Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East. *Seismological Research Letters*, v. 81, n. 2, p. 195-206, 2010. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.

ALMEIDA, A. A. D., *Análise Probabilística de Segurança Sísmica de Sistemas e Componentes Estruturais*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS / STRUCTURAL ENGINEERING INSTITUTE. *ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, EUA: ASCE, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15421: Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos: Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSUMPÇÃO, M., A regional magnitude scale for Brazil. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 73, n. 1, p. 237-246, 1983. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/73/1/237/118392/A-regional-magnitude-scale-for-Brazil?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 02 dez. 2020.

ASSUMPÇÃO, M.; PIRCHINER, M.; DOURADO, J. C.; BARROS, L. V., Terremotos no Brasil: Preparando-se para Eventos Raros. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica* (SBGf), n. 96, p. 25-29, 2016. Disponível em: [https://sbgf.org.br/noticias/images/Boletim\\_96-2016.pdf](https://sbgf.org.br/noticias/images/Boletim_96-2016.pdf). Acesso em: 01 dez. 2020.

ASSUMPÇÃO, M.; FERREIRA, J.; BARROS, L.; BEZERRA, F. H. R.; FRANÇA, G. S.; BARBOSA, J. R.; MENEZES, E.; RIBOTTA, L. C.; PIRCHINER, M.; NASCIMENTO, A.; DOURADO, J. C., Intraplate seismicity in

Brazil. In: ASSUMPÇÃO, M.; BARROS, L.; BEZERRA, F. H. R.; FRANÇA, G. S., *Intraplate seismicity*, [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. cap. 3, p. 50-71. DOI: 10.1017/CBO9781139628921.004.

ATKINSON, G. M.; BOORE, D. M., Earthquake ground-motion prediction equations for Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 96, n. 6, p. 2181-2205, 2006. DOI: 10.1785/0120050245.

ATKINSON, G. M.; BOORE, D. M., Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 101, n. 3, p. 1121-1135, 2011. DOI: 10.1785/0120100270.

BAKER, J. W., *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. White Paper Version 2.0.1, 79 p., 2013. Disponível em: [https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker\\_\(2013\)\\_Intro\\_to\\_PSHA\\_v2.pdf](https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_(2013)_Intro_to_PSHA_v2.pdf). Acesso em: 01 dez. 2020.

BEN-MENACHEM, A., A Concise History of Mainstream Seismology: Origins, Legacy, and Perspectives. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85, n. 4, p. 1202-1225, 1995. Disponível em: [https://engineering.purdue.edu/~ce597m/Handouts/ConciseHistory\\_BenMenahem.pdf](https://engineering.purdue.edu/~ce597m/Handouts/ConciseHistory_BenMenahem.pdf). Acesso em: 01 dez. 2020.

BERROCAL, J.; ASSUMPÇÃO, M.; ANTEZANA, R.; DIAS NETO, C. M.; ORTEGA, R.; FRANÇA, H.; VELOSO, J. A. V., *Sismicidade do Brasil*, São Paulo: Esperança, 1984. 320p.

BERROCAL, J.; FERNANDES, C.; BASSINI, A.; BARBOSA, J. R., Earthquake hazard assessment in Southeastern Brazil. *Geofísica Internacional*, v. 35, n. 3, p. 257-272, 1996. Disponível em: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39603/36034>. Acesso em: 01 dez. 2020.

BOORE, D. M.; CAMPBELL, K. W., Adjusting Central and Eastern North America Ground-Motion Intensity Measures between Sites with Different Reference-Rock Site Conditions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 107, n. 1, p. 132-148, 2017. DOI: 10.1785/0120160208.

BORGES, R. G.; DE ASSUMPÇÃO, M. S.; DE ALMEIDA, M. C. F.; ALMEIDA, M. S. S., Seismicity and seismic hazard in the continental margin of southeastern

Brazil. *Journal of Seismology*, v. 24, n. 6, p. 1205-1224, 2020. DOI: 10.1007/s10950-020-09941-4.

BRUNE, J., Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, v. 75, n. 26, p. 4997-5009, 1970. DOI: 10.1029/JB075i026p04997.

BUDNITZ, R. J.; APOSTOLAKIS, G.; COPPERSMITH, K.; MORRIS, P. A., *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use for Experts: NUREG/CR-6372*. v. 1. Livermore, EUA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1997. 185 p. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML0800/ML080090003.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2020.

CHIOU, B.; YOUNGS, R., An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*. v. 24, n. 1, p. 173-215, 2008. DOI: 10.1193/1.2894832.

CHIOU, B.; YOUNGS, R., Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*. v. 30, n. 3, p. 1117-1153, 2014. DOI: 10.1193/072813EQS219M.

CHUNG, D. H.; BERNREUTER, D. L., Regional relationships among earthquake magnitude scales. *Reviews of Geophysics*, v. 19, n. 4, p. 649-663, 1981. DOI: 10.1029/RG019i004p00649

CORNELL, C. A., Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 58, n. 5, p. 1583-1606, 1968. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/58/5/1583/116673/Engineering-seismic-risk-analysis?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 01 dez. 2020.

DE ALMEIDA, A. A. D.; ASSUMPCÃO, M.; BOMMER, J. J.; DROUET, S.; RICCOMINI, C.; PRATES, C. L. M., Probabilistic seismic hazard analysis for a nuclear power plant site in southeast Brazil. *Journal of Seismology*, v. 23, n. 1, p. 1-23, 2019. DOI: 10.1007/s10950-018-9755-8.

DELAUVAUD, E.; COTTON, F.; AKKAR, S.; SCHERBAUM, F.; DANCIU, L.; BEAUVAL, C.; DROUET, S.; DOUGLAS, J.; BASILI, R.; SANDIKKAYA, M. A.; SEGOU, M.; FACCIOLI, E.; THEODOULIDIS, N., Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. *Journal of Seismology*, v. 16, n. 3, p. 451-473, 2012. DOI: 10.1007/s10950-012-9281-z.

DOURADO, J. C. *Mapa de Ameaça Sísmica na Plataforma Continental do Sul/Sudeste*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 13, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: [https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded\\_abstracts/13th\\_CISBGf/Mapa%20de%20Amea%C3%A7a%20S%C3%ADsmica%20na%20Plataforma%20Continental%20do%20Sul-Sudeste.pdf](https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/13th_CISBGf/Mapa%20de%20Amea%C3%A7a%20S%C3%ADsmica%20na%20Plataforma%20Continental%20do%20Sul-Sudeste.pdf). Acesso em: 01 dez. 2020.

DOURADO, J. C., *Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil: Versão Inicial*. 52 slides, Salvador, 2014. Palestra apresentada no 47º Congresso Brasileiro de Geologia.

DROUET, S.; COTTON, F.; BEAUVAL, C., *Deliverable 4.2: Regionally adjusted Ground Motion Prediction Equations (GMPE) for Europe*. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: [http://www.share-eu.org/sites/default/files/D4%202\\_SHARE.pdf](http://www.share-eu.org/sites/default/files/D4%202_SHARE.pdf). Acesso em: 14 dez. 2020.

EUROCÓDIGO 8 - *Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras Gerais, ações sísmicas e regras para edifícios*. Bruxelas: Comitê Europeu de Normalização, 2010. Versão portuguesa da EN 1998-1:2004 + AC: 2009.

GUPTA, H. K., *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2011. 1539 p. ISBN: 978-90-481-8701-0.

LEE, H. K.; KANAMORI, H.; JENNINGS, P. C.; KISSLINGER, C., *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. v. 81, pt. B. Amsterdam: Academic Press, 2003. 1942 p. ISBN: 0-12-440658-0.

MARZA, V. I.; BARROS, L. V.; CHIMPLIGANOND, C. N.; CAIXETA, D. F., *Breve Caracterização da Sismicidade no Ceará*. Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, 2004.

MCGUIRE, R. K., *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Boulder, EUA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2004. 221 p. (MNO-10, Original

Monograph Series: Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records).

MCGUIRE, R. K.; ARABASZ, W. J., An introduction to probabilistic seismic hazard analysis, in geotechnical and environmental geophysics. *In: WARD, S. H., Geotechnical and environmental geophysics*, v. 1, p. 333–353, Tulsa, EUA: Society of Exploration Geophysicist, 1990.

MONROY, M.; BOLAÑOS, A.; MUÑOZ, A.; BLONDET, M., *Espectros del Peligro Uniforme en El Perú*. *In: CONGRESO CHILENO DE SISMOLOGÍA E INGENIERÍA ANTISÍSMICA: IX JORNADAS*, Concepción, Chile, 2005. n. A01-02.

ORDAZ, M.; SALGADO-GÁLVEZ M. A., *R-CRISIS Validation and Verification Document*. ERN Technical Report. Mexico City, Mexico, 2019. Disponível em: [http://www.r-crisis.com/Content/files/R-CRISIS%20Documentation\\_All\\_chapters.pdf](http://www.r-crisis.com/Content/files/R-CRISIS%20Documentation_All_chapters.pdf). Acesso em: 01 dez. 2020.

PECKER, A.; FACCIOLI, E.; GURPINAR, A.; MARTIN, M.; RENAULT, P., *An Overview of the SIGMA Research Project: A European Approach to Seismic Hazard Analysis*, v. 42. Cham, Switzerland: Springer, 2017. 172 p. ISSN 1573-6059.

PETSCHACHER SOFTWARE UND PROJEKTENTWICKLUNGS. **VaP – Variables Processor, Version 4.0**, 2017. Disponível em: <https://www.petschacher.at/en/software-it/>. Acesso em: 01 dez. 2020.

PEZESHK, S.; ZANDIEH, A.; TAVAKOLI, B., Hybrid empirical ground-motion prediction equations for Eastern North America using NGA models and updated seismological parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 101, n. 4, p. 1859-1870, 2011. DOI: 10.1785/0120100144.

PEZESHK, S.; ZANDIEH, A.; CAMPBELL, K. W.; TAVAKOLI, B., Ground-motion prediction equations for Central and Eastern North America using the hybrid empirical method and NGA-West2 empirical ground-motion models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 108, n. 4, p. 2278-2304, 2018. DOI: 10.1785/0120170179.

PIRCHINER, M., *Técnicas de suavização aplicadas à caracterização de fontes sísmicas e à análise probabilística de ameaça sísmica*. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática da Informação) - Escola de Matemática Aplicada, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/14010?locale-attribute=en>. Acesso em: 02 dez. 2020.

RONCAL CASTRO, M. A., *Determinación del Peligro Sísmico en el Territorio Nacional y Elaboración de Aplicativo WEB*. Tesis de Grado - Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2017. Disponível em: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/12214>. Acesso em: 01 dez. 2020.

SANTOS, S. H. C.; LIMA S. S., *The new Brazilian standard for seismic design*. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING (WCEE), 14, Beijing, China, 2008. Disponível em: [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_08-01-0004.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_08-01-0004.pdf). Acesso em: 01 dez. 2020.

SILVA, F. C. M., *Avaliação do Risco Sísmico nas Regiões Nordeste e Sudeste do Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007123.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2020.

SILVA, R. H. M., *Estudo da Ameaça Sísmica na Região Sudeste do Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10026443.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2020.

SOUZA, B. R. S., *Projeto de estruturas submetidas a sismo: geração de espectros de respostas e mapas de perigo sísmico*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: [https://monografias.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/9037/1/Projeto-estruturas-submetidas-sismo\\_Souza\\_2019.pdf](https://monografias.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/9037/1/Projeto-estruturas-submetidas-sismo_Souza_2019.pdf). Acesso em: 14 dez. 2020.

STEWART, J. P.; DOUGLAS, J.; JAVANBARG, M.; BOZORGNIA, Y.; ABRAHAMSON, N. A.; BOORE, D. M.; CAMPBELL, K. W.; DELAUAUD, E.;

ERDIK, M.; STAFFORD, P. J., Selection of Ground Motion Prediction Equations for the Global Earthquake Model. *Earthquake Spectra*, v. 31, n. 1, p. 19–45, 2015. DOI: 10.1193/013013EQS017M.

SUCUOGLU, H.; AKKAR, S., *Basic Earthquake Engineering: From Seismology to Analysis and Design*. Cham, Switzerland: Springer, 2014. 288 p. ISBN 978-3-319-01025-0.

TAVERA, H.; BERNAL, I.; CONDORI, C.; ORDAZ, M.; ZEVALLOS, A.; ISHIZAWA, O., *Re-evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico para el Perú*. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú, 2014. Disponível em: [https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/IGP/783/evaluacion\\_Peligro\\_Sismico\\_Peru.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/IGP/783/evaluacion_Peligro_Sismico_Peru.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 01 dez. 2020.

TOLEDO, M. C. M., Estrutura interna da Terra. In: TOLEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W.; BOUROTTE, C. L. M., *Geologia*. São Paulo: Usp/Univesp/Edusp, p. 55-80, 2014. Disponível em: [https://midia.atp.usp.br/plc/plc0011/impessos/plc0011\\_03.pdf](https://midia.atp.usp.br/plc/plc0011/impessos/plc0011_03.pdf). Acesso em: 01 dez. 2020.

TORO, G. R., ABRAHAMSON, N. A., SCHNEIDER, J. F., A model of strong ground motions from earthquakes in Central and Eastern North America: Best estimates and uncertainties. *Seismological Research Letters*, v. 68, n. 1, p. 41-57, 1997. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.41.

TORO, G. R., *Modification of the Toro et al. (1997) attenuation equations for large magnitudes and short distances*. [S. l.: s. n.], 2002. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/237314089\\_Modification\\_of\\_the\\_Toro\\_et\\_al1997\\_attenuation\\_equations\\_for\\_large\\_magnitudes\\_and\\_short\\_distances](https://www.researchgate.net/publication/237314089_Modification_of_the_Toro_et_al1997_attenuation_equations_for_large_magnitudes_and_short_distances). Acesso em: 01 dez. 2020.

VAN HOUTTE, C.; DROUET, S.; COTTON, F., Analysis of the Origins of  $k$  (Kappa) to Compute Hard Rock to Rock Adjustment Factors for GMPEs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 101, n. 6, p. 2926-2941, 2011. DOI: 10.1785/0120100345.

VROCHIDOU, E.; ALVANITOPOULOS, P.; ANDREADIS I.; MALLOUSI K.; ELENAS A., Synthesis of artificial spectrum-compatible seismic accelerograms.

*Measurement Science and Technology*, v. 25, n. 8, 2014. DOI: 10.1088/0957-0233/25/8/085002.

ZHAO, J. X.; ZHANG, J.; ASANO, A.; OHNO, Y.; OOUCHI, T.; TAKAHASHI, T.; OGAWA, H.; IRIKURA, K.; THIO, H. K.; SOMERVILLE, P. G.; FUKUSHIMA, Y., Attenuation relations of Strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 96, n. 3, p. 898-913, 2006. DOI: 10.1785/0120050122.

## 11. SÍTIOS DA INTERNET

---

GEOFORSCHUNGSZENTRUM-POTSDAM. Global Seismic Hazard Map. In: <https://www.gfz-potsdam.de/en/GSHAP/> Acesso em 30 de jun. de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias>>. Acesso em: 30 de jun. de 2020.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ (IGP), Disponível em: <<http://www.igp.gob.pe/version-anterior>>. Acesso em: 30 de jun. de 2020.

REDE SISMOGRÁFICA BRASILEIRA (RSBR), Disponível em: <<http://www.rsbr.gov.br>>. Acesso em: 30 de jun. de 2020.

R-CRISIS. Disponível em: <<http://www.r-crisis.com/download/binaries>>. Acesso em: 30 de jun. 2020.

SERVIÇO WEB DE CONSULTAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EM EL TERRITÓRIO NCAIONAL, Disponível em: <<http://page.sencico.gob.pe/publicaciones.php?id=331>>. Acesso em: 30 de jun. de 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Disponível em: <<http://www.earthquake.usgs.gov/hazards/designmaps/grdmotion.php>>. Acesso em: 30 de jun. de 2020.

## 12. ANEXOS

### 12.1. Tabelas de acelerações horizontais e Espectro de Ameaça Uniforme por Região

#### 12.1.1. Sudeste

Tabela 12-1 - Acelerações horizontais para Cabo Frio

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,026	0,085	0,216
40	0,025	0,037	0,129	0,336
35	0,0286	0,040	0,137	0,355
30	0,0333	0,042	0,142	0,363
25	0,040	0,045	0,148	0,371
20	0,050	0,046	0,149	0,364
16	0,0625	0,046	0,148	0,357
12,5	0,080	0,046	0,147	0,348
10	0,10	0,045	0,143	0,333
8	0,125	0,044	0,137	0,318
6,667	0,15	0,042	0,132	0,304
5	0,20	0,038	0,118	0,269
4	0,25	0,032	0,104	0,239
3	0,30	0,028	0,092	0,213
2,5	0,40	0,020	0,072	0,170
2	0,50	0,016	0,061	0,148
1,333	0,75	0,010	0,043	0,110
1	1,0	0,006	0,031	0,081
0,667	1,5	0,004	0,020	0,055
0,5	2,0	0,002	0,012	0,036

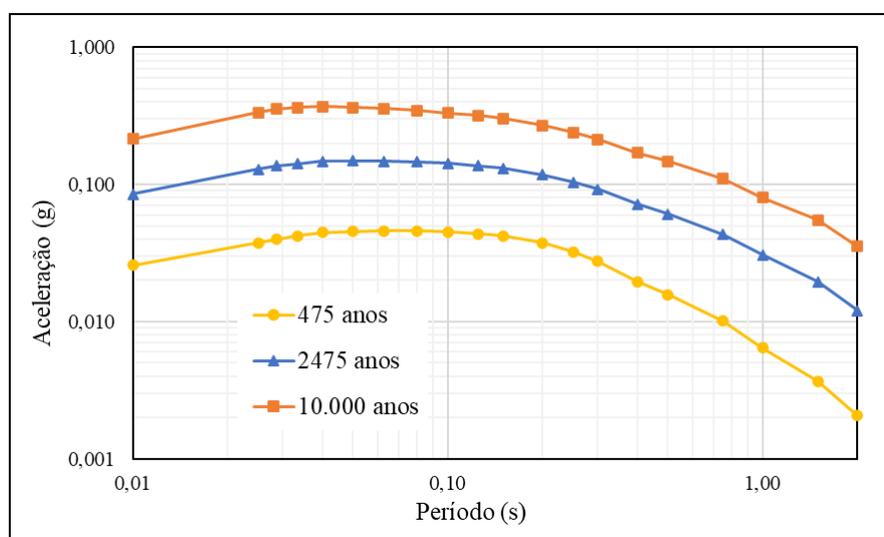


Figura 12-1 - Espectros de Ameaça Uniforme para Cabo Frio, escala logarítmica

Tabela 12-2 - Acelerações horizontais para Itaguaí

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,016	0,048	0,106
40	0,025	0,024	0,075	0,170
35	0,0286	0,026	0,079	0,179
30	0,0333	0,027	0,081	0,180
25	0,040	0,028	0,083	0,180
20	0,050	0,028	0,082	0,174
16	0,0625	0,028	0,080	0,168
12,5	0,080	0,027	0,077	0,160
10	0,10	0,026	0,073	0,150
8	0,125	0,025	0,069	0,141
6,667	0,15	0,024	0,066	0,134
5	0,20	0,020	0,057	0,117
4	0,25	0,017	0,049	0,102
3	0,30	0,013	0,042	0,090
2,5	0,40	0,008	0,032	0,072
2	0,50	0,006	0,027	0,062
1,333	0,75	0,004	0,017	0,045
1	1,0	0,002	0,012	0,033
0,667	1,5	0,001	0,007	0,022
0,5	2,0	0,001	0,004	0,014

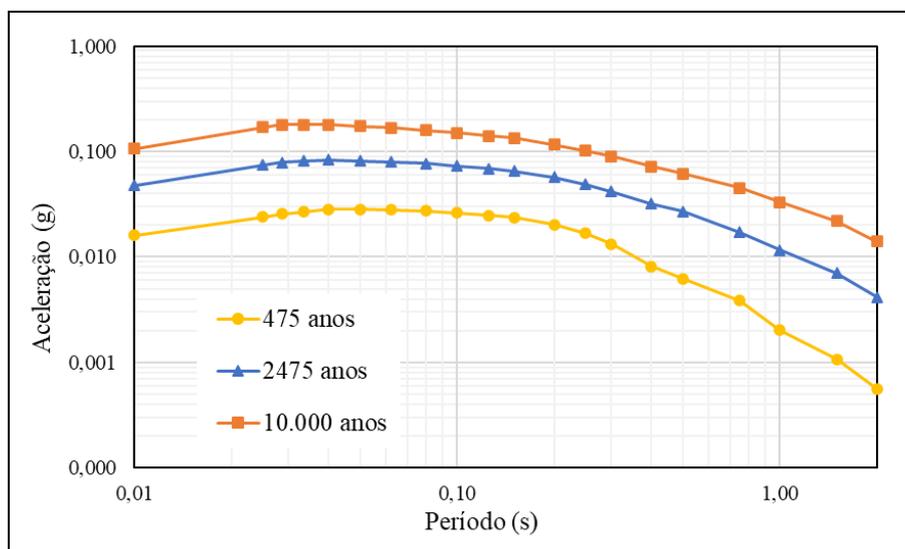


Figura 12-2 - Espectros de Ameaça Uniforme para Itaguaí, escala logarítmica

Tabela 12-3 -Acelerações horizontais para Angra dos Reis

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,016	0,046	0,103
40	0,025	0,023	0,073	0,167
35	0,0286	0,025	0,077	0,175
30	0,0333	0,026	0,079	0,176
25	0,040	0,027	0,080	0,175
20	0,050	0,027	0,079	0,168
16	0,0625	0,027	0,076	0,161
12,5	0,080	0,026	0,073	0,153
10	0,10	0,025	0,069	0,142
8	0,125	0,024	0,065	0,134
6,667	0,15	0,023	0,062	0,126
5	0,20	0,019	0,053	0,109
4	0,25	0,016	0,045	0,094
3	0,30	0,012	0,038	0,082
2,5	0,40	0,007	0,029	0,064
2	0,50	0,006	0,025	0,055
1,333	0,75	0,003	0,015	0,040
1	1,0	0,002	0,010	0,029
0,667	1,5	0,001	0,006	0,019
0,5	2,0	0,000	0,004	0,012

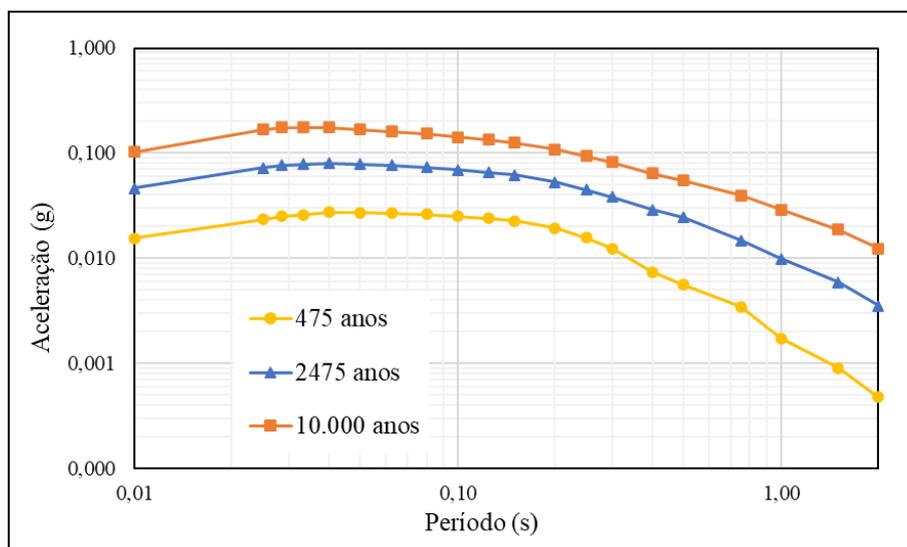


Figura 12-3 - Espectros de Ameaça Uniforme para Angra dos Reis, escala logarítmica

12.1.2. Nordeste

Tabela 12-4 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Nordeste 1

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,049	0,142	0,324
40	0,025	0,076	0,228	0,526
35	0,0286	0,081	0,240	0,550
30	0,0333	0,084	0,242	0,550
25	0,040	0,086	0,242	0,541
20	0,050	0,084	0,232	0,512
16	0,0625	0,082	0,223	0,487
12,5	0,080	0,079	0,211	0,454
10	0,10	0,075	0,197	0,418
8	0,125	0,071	0,185	0,391
6,667	0,15	0,067	0,174	0,366
5	0,20	0,057	0,147	0,308
4	0,25	0,047	0,124	0,263
3	0,30	0,039	0,105	0,225
2,5	0,40	0,026	0,075	0,165
2	0,50	0,020	0,061	0,138
1,333	0,75	0,012	0,041	0,097
1	1,0	0,008	0,028	0,067
0,667	1,5	0,004	0,017	0,043
0,5	2,0	0,002	0,010	0,026

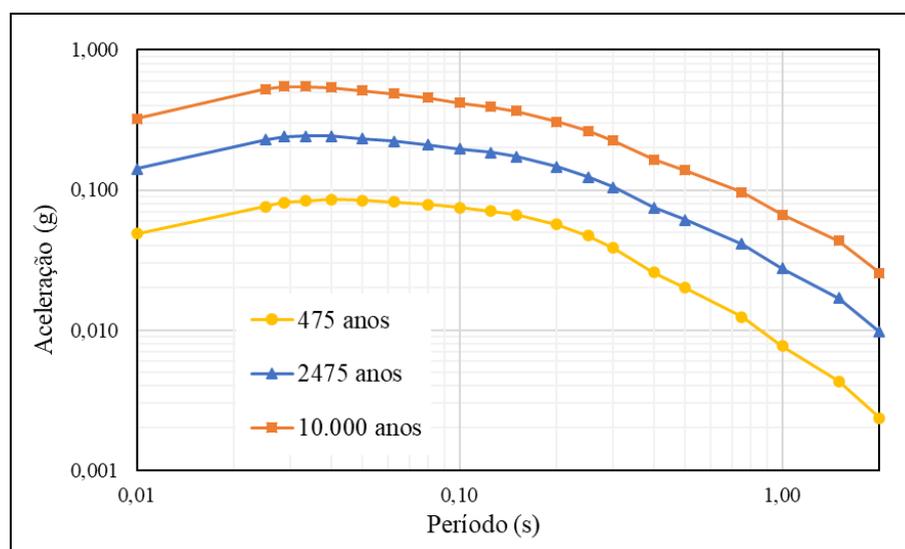


Figura 12-4 - Espectros de Ameaça Uniforme para Ponto Crítico do Nordeste 1, escala logarítmica

Tabela 12-5 - Acelerações horizontais para Ponto Crítico do Nordeste 2

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,018	0,056	0,133
40	0,025	0,028	0,090	0,218
35	0,0286	0,030	0,095	0,228
30	0,0333	0,032	0,097	0,228
25	0,040	0,033	0,098	0,224
20	0,050	0,033	0,094	0,211
16	0,0625	0,032	0,090	0,199
12,5	0,080	0,031	0,085	0,184
10	0,10	0,029	0,079	0,168
8	0,125	0,028	0,073	0,155
6,667	0,15	0,026	0,068	0,143
5	0,20	0,022	0,056	0,115
4	0,25	0,018	0,045	0,093
3	0,30	0,014	0,035	0,073
2,5	0,40	0,008	0,021	0,045
2	0,50	0,006	0,016	0,034
1,333	0,75	0,003	0,009	0,020
1	1,0	0,002	0,005	0,011
0,667	1,5	0,001	0,003	0,006
0,5	2,0	0,000	0,001	0,003

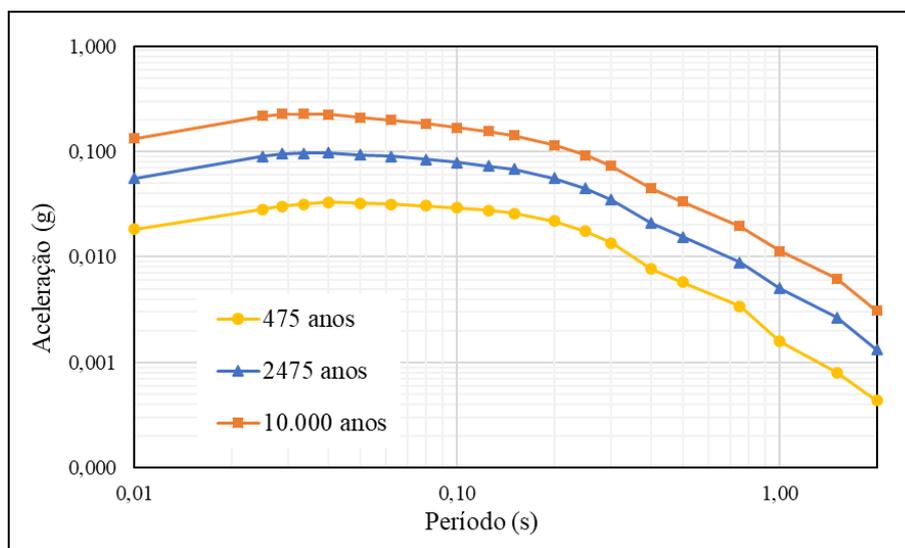


Figura 12-5 - Espectros de Ameaça Uniforme para Ponto Crítico do Nordeste 2, escala logarítmica

Tabela 12-6 - Acelerações horizontais para Fortaleza

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,048	0,142	0,324
40	0,025	0,075	0,228	0,526
35	0,0286	0,080	0,239	0,550
30	0,0333	0,082	0,241	0,549
25	0,040	0,084	0,240	0,540
20	0,050	0,082	0,230	0,511
16	0,0625	0,080	0,221	0,486
12,5	0,080	0,077	0,208	0,452
10	0,10	0,073	0,194	0,417
8	0,125	0,068	0,182	0,389
6,667	0,15	0,064	0,171	0,364
5	0,20	0,054	0,144	0,306
4	0,25	0,045	0,121	0,260
3	0,30	0,036	0,101	0,221
2,5	0,40	0,024	0,072	0,161
2	0,50	0,018	0,058	0,134
1,333	0,75	0,011	0,038	0,093
1	1,0	0,007	0,025	0,063
0,667	1,5	0,004	0,015	0,041
0,5	2,0	0,002	0,009	0,024

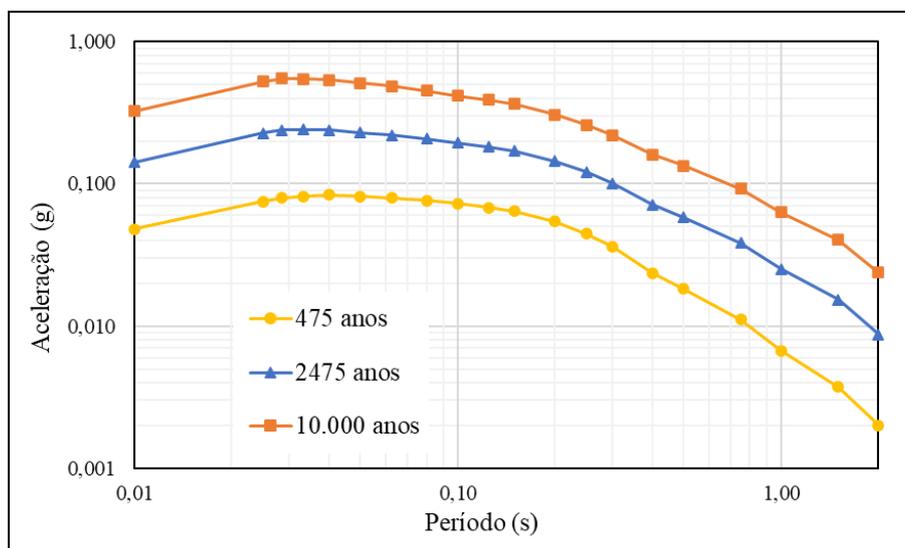


Figura 12-6 - Espectros de Ameaça Uniforme para Fortaleza, escala logarítmica

Tabela 12-7 - Acelerações horizontais para Natal

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,048	0,142	0,324
40	0,025	0,075	0,228	0,526
35	0,0286	0,080	0,240	0,550
30	0,0333	0,082	0,242	0,549
25	0,040	0,084	0,241	0,541
20	0,050	0,082	0,231	0,511
16	0,0625	0,080	0,221	0,486
12,5	0,080	0,077	0,209	0,453
10	0,10	0,073	0,195	0,417
8	0,125	0,069	0,183	0,389
6,667	0,15	0,065	0,172	0,365
5	0,20	0,055	0,145	0,307
4	0,25	0,045	0,122	0,261
3	0,30	0,036	0,102	0,222
2,5	0,40	0,024	0,072	0,162
2	0,50	0,018	0,058	0,134
1,333	0,75	0,011	0,038	0,093
1	1,0	0,007	0,025	0,063
0,667	1,5	0,004	0,015	0,041
0,5	2,0	0,002	0,009	0,024

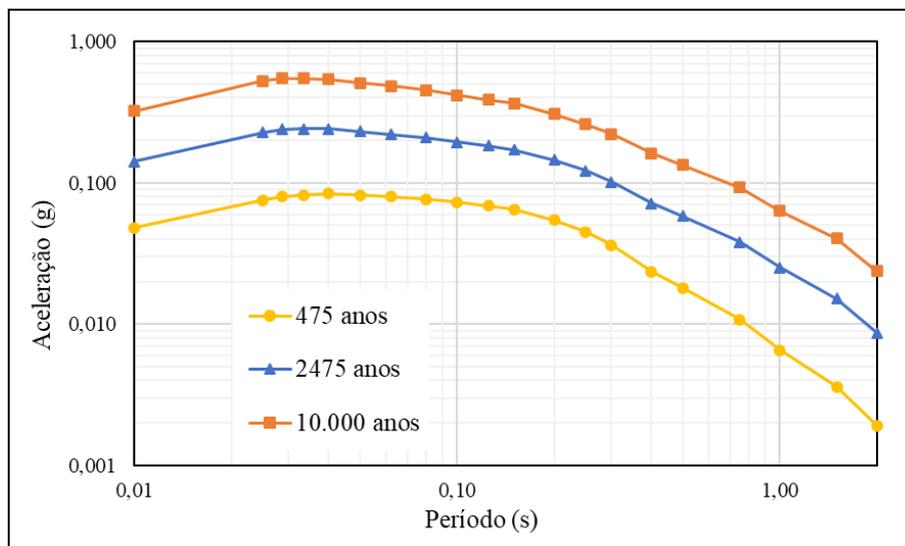


Figura 12-7 - Espectros de Ameaça Uniforme para Natal, escala logarítmica

Tabela 12-8 - Acelerações horizontais para João Pessoa

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,045	0,139	0,322
40	0,025	0,071	0,223	0,523
35	0,0286	0,075	0,235	0,547
30	0,0333	0,077	0,236	0,545
25	0,040	0,078	0,234	0,535
20	0,050	0,076	0,223	0,505
16	0,0625	0,073	0,213	0,479
12,5	0,080	0,070	0,200	0,445
10	0,10	0,066	0,186	0,409
8	0,125	0,062	0,173	0,381
6,667	0,15	0,058	0,162	0,356
5	0,20	0,048	0,134	0,296
4	0,25	0,038	0,110	0,249
3	0,30	0,030	0,090	0,209
2,5	0,40	0,018	0,061	0,148
2	0,50	0,013	0,048	0,120
1,333	0,75	0,008	0,030	0,079
1	1,0	0,004	0,019	0,052
0,667	1,5	0,002	0,011	0,032
0,5	2,0	0,001	0,006	0,019

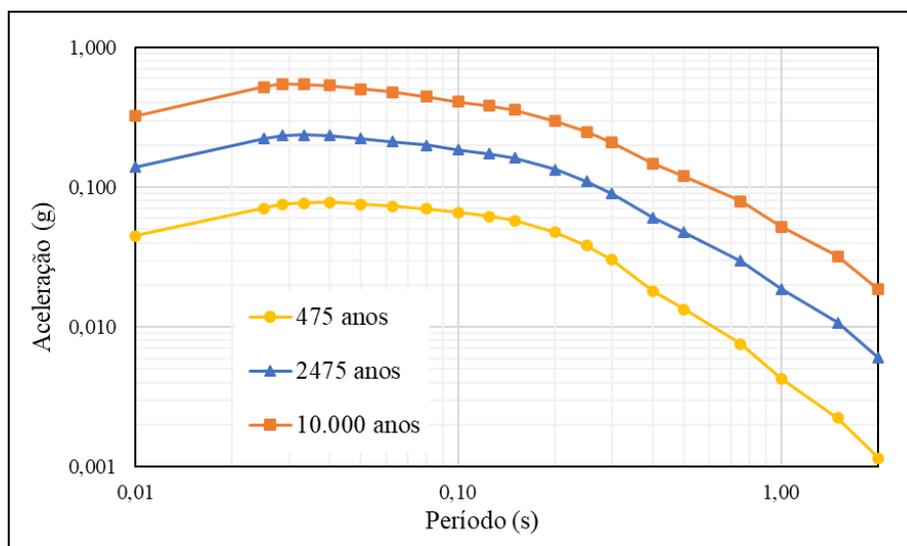


Figura 12-8 - Espectros de Ameaça Uniforme para João Pessoa, escala logarítmica

12.1.3. Mato Grosso

Tabela 12-9 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Mato Grosso

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,070	0,210	0,485
40	0,025	0,112	0,341	0,790
35	0,0286	0,119	0,359	0,829
30	0,0333	0,122	0,362	0,830
25	0,040	0,125	0,362	0,820
20	0,050	0,122	0,345	0,776
16	0,0625	0,118	0,329	0,735
12,5	0,080	0,111	0,307	0,678
10	0,10	0,102	0,278	0,611
8	0,125	0,095	0,256	0,560
6,667	0,15	0,088	0,235	0,513
5	0,20	0,076	0,201	0,433
4	0,25	0,064	0,172	0,373
3	0,30	0,054	0,149	0,324
2,5	0,40	0,038	0,110	0,243
2	0,50	0,032	0,095	0,213
1,333	0,75	0,022	0,069	0,159
1	1,0	0,014	0,048	0,113
0,667	1,5	0,008	0,031	0,076
0,5	2,0	0,005	0,018	0,045

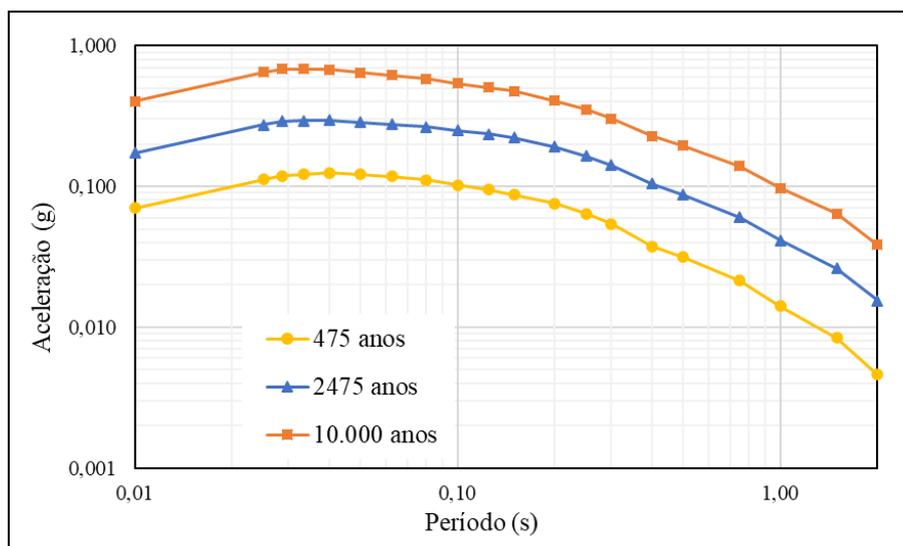


Figura 12-9 - Espectros de Ameaça Uniforme para o Ponto Crítico do Mato Grosso, escala logarítmica

12.1.4. Centro-Oeste

Tabela 12-10 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Centro-Oeste

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,019	0,059	0,141
40	0,025	0,030	0,096	0,233
35	0,0286	0,032	0,102	0,244
30	0,0333	0,034	0,103	0,243
25	0,040	0,035	0,104	0,238
20	0,050	0,034	0,099	0,223
16	0,0625	0,033	0,093	0,208
12,5	0,080	0,031	0,086	0,188
10	0,10	0,028	0,076	0,164
8	0,125	0,026	0,069	0,147
6,667	0,15	0,024	0,062	0,131
5	0,20	0,020	0,052	0,108
4	0,25	0,016	0,042	0,088
3	0,30	0,013	0,034	0,072
2,5	0,40	0,007	0,021	0,046
2	0,50	0,005	0,017	0,038
1,333	0,75	0,003	0,011	0,026
1	1,0	0,002	0,007	0,017
0,667	1,5	0,001	0,004	0,010
0,5	2,0	0,001	0,002	0,006

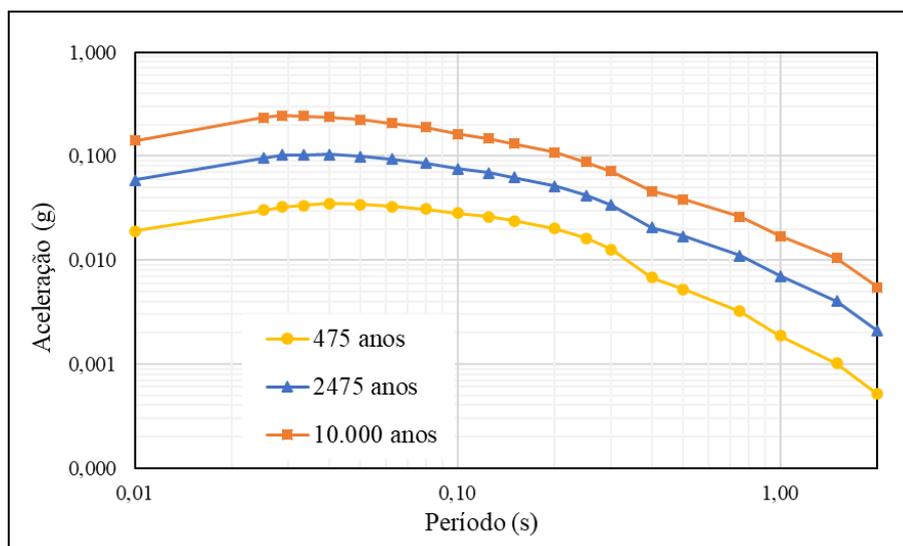


Figura 12-10 - Espectros de Ameaça Uniforme para o Ponto Crítico do Centro-Oeste, escala logarítmica

12.1.5. Amazonas

Tabela 12-11 - Acelerações horizontais para o Ponto Crítico do Amazonas

Frequência de Onda (Hz)	Período da Estrutura (s)	475 anos	2475 anos	10.000 anos
100	0,010	0,016	0,055	0,145
40	0,025	0,022	0,083	0,224
35	0,0286	0,024	0,088	0,237
30	0,0333	0,025	0,093	0,244
25	0,040	0,027	0,098	0,252
20	0,050	0,028	0,099	0,248
16	0,0625	0,028	0,099	0,245
12,5	0,080	0,029	0,099	0,240
10	0,10	0,028	0,096	0,230
8	0,125	0,028	0,093	0,220
6,667	0,15	0,027	0,090	0,210
5	0,20	0,024	0,080	0,185
4	0,25	0,021	0,070	0,163
3	0,30	0,017	0,061	0,143
2,5	0,40	0,012	0,046	0,110
2	0,50	0,009	0,038	0,093
1,333	0,75	0,006	0,026	0,067
1	1,0	0,003	0,018	0,047
0,667	1,5	0,002	0,011	0,030
0,5	2,0	0,001	0,006	0,018

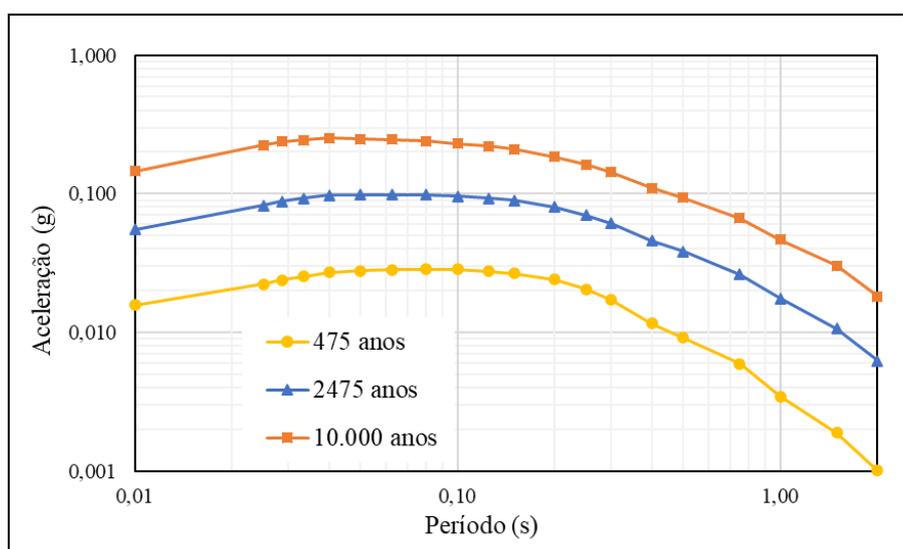


Figura 12-11 - Espectros de Ameaça Uniforme para o Ponto Crítico do Amazonas, escala logarítmica