



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**BRUNO RAMMON SILVA SOUZA**

**PROJETO DE ESTRUTURAS SUBMETIDAS A SISMO:  
GERAÇÃO DE ESPECTROS DE RESPOSTAS E MAPAS DE  
PERIGO SÍSMICO**

**NATAL-RN  
2019**

Bruno Rammon Silva Souza

Projeto de estruturas submetidas a sismo: geração de espectros de respostas e mapas de perigo sísmico

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega  
Coorientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Selma Hissae Shimura da Nóbrega

Natal-RN  
2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Souza, Bruno Rammon Silva.

Projeto de estruturas submetidas a sismo: geração de espectros de respostas e mapas de perigo sísmico / Bruno Rammon Silva Souza. - 2019.

126f.: il.

Monografia (Graduação)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega.

Coorientador: Dr.<sup>a</sup> Selma Hissae Shimura da Nóbrega.

1. Sismos - Monografia. 2. Mapa de Perigo Sísmico - Monografia. 3. Análise Probabilística de Perigo Sísmico - Monografia. 4. Espectro de Resposta - Monografia. 5. Análise Espectral. I. Nóbrega, Petrus Gorgônio Bulhões da. II. Nóbrega, Selma Hissae Shimura da. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.131.55

Bruno Rammon Silva Souza

Projeto de estruturas submetidas a sismo: geração de espectros de respostas e mapas de perigo sísmico

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Aprovado em 17 de junho de 2019:**

---

Prof. Dr. Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega – Orientador

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Selma Hissae Shimura da Nóbrega – Coorientadora

---

Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira, Unicamp

---

Geofísico, Me. Daniel Évora de Queiroz

Natal-RN

2019

## DEDICATÓRIA

À Deus, pois para Ele são  
todas as coisas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e acima de tudo a Deus sem ele nada disso seria possível.

À minha mãe, Neta, pelo seu amor sacrificial demonstrado com sua própria vida. Ela me ensinou sobre a vida, sobre valores, e tantas outras coisas. Mas, sem dúvida, o maior de todos ensinamentos que essa notável mulher e mãe me tem dado é: ame a Deus acima de todas as coisas. Por tudo isso, sou imensamente grato a ela.

Ao meu pai, Dogival, pela sua constante disposição. Ele nunca mediu esforços para ajudar a seus filhos. Ele me ensinou que melhor é dar do que receber.

À toda Igreja Batista de Nova Parnamirim essa comunidade de redimidos pelo sangue de Cristo que muito tem me ensinado desde novo sobre o amar e servir.

À toda Mocidade Kainos pelas bricadeiras, pelas conversas sérias e pelas jogadas fora, pela amizade, pelo amor mútuo. Vocês me ensinaram que vida não deve ser levada assim tão a sério, que rir e se alegrar é essencial para a vida.

A todos os meus professores do jardim ao superior. Gostaria de citar o nome de todos aqui, pois o ensino de cada um foi profundamente importante para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Ao professor Petrus Gorgônio e à professora Selma Hissae pela insistência deles em inovar em suas pesquisas, em sair da "zona de conforto acadêmico". Sem essa inquietação deles esse trabalho não teria, nem sequer, começado ou continuado.

A Petrus que não foi apenas um profissional em sua orientação, mas foi extremamente humano. Ele me ensinou (e ajudou) a continuar tentando mesmo quando eu não via uma "luz" para esse trabalho. Muito desse TCC também tem suor do seu esforço.

À equipe do R-CRISIS por disponibilizar gratuitamente este *software* na internet ajudando a todos os que tem enveredado na área da PSHA.

À equipe do TQS pela cessão do software que muito foi útil para este trabalho.

Mais uma vez a Deus, pois reconheço que foi ele, em sua soberana providência, que fez com que meu caminho se cruzasse com o de cada pessoa aqui mencionada (e tantas outras). Tenho plena certeza de que ele teve um propósito muito bem definido e delineado para cada um desses "encontros". *Soli Deo Gloria*.

*"Não aconteça que, [depois de prosperarem], o seu coração fique orgulhoso e vocês se esqueçam do Senhor, o seu Deus [...]. Não digam, pois, em seu coração: 'A minha capacidade e a força das minhas mãos ajuntaram para mim toda a riqueza'. Mas, lembrem-se do Senhor, o seu Deus, pois é ELE que lhes dá a capacidade de produzir riqueza [...]."*

Deuteronômio 8:11-18

## **RESUMO**

### **Projeto de estruturas submetidas a sismo: geração de espectros de respostas e mapas de perigo sísmico**

Uma das principais etapas do projeto de estruturas submetidas a sismos é a determinação da demanda sísmica. Para isso, as normas sísmicas de cada local têm estabelecido mapas de acelerações sísmicas, sendo a determinação dessa variável um dos primeiros passos necessários para a adequada realização desse tipo de projeto. Geralmente, esses mapas são elaborados a partir de estudos estatísticos. Assim, no presente trabalho, são apresentadas as principais etapas da Análise Probabilística de Perigo Sísmico (PSHA), que tem sido a metodologia mais empregada para construção desses mapas. Desta maneira, explora-se a aplicação da PSHA na construção de espectros de respostas de projeto por dois procedimentos distintos. Além disso, buscou-se examinar, de forma geral, algumas das principais propostas de mapas de perigo sísmico, abordando, em cada uma, os principais parâmetros usados e os resultados obtidos por elas, mostrando, com isso, a necessidade de readequação do atual mapa da ABNT NBR 15421:2006. Por último, dentro do contexto dos espectros de resposta, foi realizada, em duas estruturas modelo, a análise sísmica com o espectro de projeto fornecido pela norma sísmica nacional NBR 15421:2006 avaliando os esforços.

Palavras-chave: Sismos. Mapa de Perigo Sísmico. Análise Probabilística de Perigo Sísmico. Espectro de Resposta. Análise Espectral.



## **ABSTRACT**

### **Design of structure for seismic actions: response spectra and seismic hazard maps generation**

One of the main steps in the design of structures subjected to seismic actions is the determination of the seismic demand. For this, the seismic codes of each place have established maps of characteristic seismic accelerations, being the determination of this variable one of the first necessary steps for the adequate accomplishment of this type of project. Generally, these maps are based on statistical studies. Thus, the main steps of Probabilistic Analysis of Seismic Hazard (PSHA), which has been the most used methodology for the construction of these maps, are presented in the present work. In that way, the application of PSHA in the construction of seismic response spectra by two different procedures is explored. In addition, some of the main seismic hazard map proposals are examined, addressing, for each one, the main parameters used and the results obtained by them, showing, therefore, the need to readjust the current map of ABNT NBR 15421:2006. Finally, in the context of response spectra, a seismic analysis considering two model structures was performed using a design spectrum obtained by the national seismic code and their internal forces were evaluated.

Keywords: Earthquake. Seismic Hazard Maps. Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Response Spectrum. Spectral Analysis.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	19
1.1 Tema e motivação .....	19
1.2 Objetivos.....	24
1.1.1 Objetivo Geral.....	24
1.1.2 Objetivos Específicos .....	24
1.3 Organização da monografia.....	24
2. CONCEITOS INICIAIS .....	26
2.1 Sismos e sismicidade intraplaca.....	26
2.2 Falhas Geológicas .....	28
2.3 Perigo Sísmico.....	30
2.4 Vulnerabilidade Sísmica .....	30
2.5 Risco Sísmico .....	32
2.6 Escalas de magnitude e intensidade .....	33
3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE PERIGO SÍSMICO (PSHA).....	35
3.1 Considerações gerais .....	35
3.2 Identificação e caracterização de fontes sísmicas.....	36
3.3 Caracterização da distribuição de distâncias e do movimento do terreno através das GMPE (“ <i>Ground Motions Prediction Equations</i> ”).....	42
3.4 Integrando as informações .....	47
4. METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE ESPECTROS DE RESPOSTA A PARTIR DA PSHA.....	50
4.1 Espectros de respostas .....	50
4.2 Fundamentos gerais para geração de espectros de resposta através da PSHA	52
4.3 Procedimento manual de geração de espectro de resposta.....	54
4.3.1 Definição da fonte sísmica e de sua discretização .....	54

4.3.2	Discretização em sub-regiões .....	55
4.3.3	Distâncias.....	55
4.3.4	Caracterização de sismicidade da fonte.....	56
4.3.5	Caracterização da distribuição de acelerações espectrais.....	58
4.3.6	Cálculo de períodos de retorno .....	61
4.3.7	Construção do espectro de acelerações .....	63
4.4	Procedimento utilizando-se o Software R-CRISIS 18.4.2.....	66
4.4.1	Software R-CRISIS 18.4.2.....	66
4.4.2	Delimitação de fonte sísmica.....	67
4.4.3	Caracterização de sismicidade.....	68
4.4.4	Definição de ordenadas espectrais .....	69
4.4.5	Definição da GMPE .....	71
4.4.6	Curvas de $PE \times SA$ .....	73
4.4.7	Espectro de resposta.....	74
5.	GERAÇÃO DE MAPAS DE PERIGO SÍSMICO.....	76
5.1	Sobre as propostas de mapas do Brasil .....	76
5.1.1	Proposta do GSHAP.....	76
5.1.2	Proposta de Assumpção et al. (2016) .....	79
5.1.3	Proposta de Petersen et al. (2018a).....	82
5.2	Mapas de perigo sísmico para o RN.....	85
6.	TESTES COMPLEMENTARES COM O R-CRISIS 18.4.2 .....	89
6.1	Proporção das dimensões de falha (“Aspect ratio”).....	89
6.2	Coeficiente de variação (CV) de $\beta$ .....	89
6.3	Profundidade da fonte.....	90
6.4	Direção de mergulho (“Dip”) .....	91
6.5	Intervalo de incerteza da magnitude máxima (Mu) .....	91

6.6	Parâmetro $K_1$ e $K_2$ .....	92
6.7	Ângulo strike .....	93
7.	ANÁLISE SÍSMICA ESPECTRAL .....	95
7.1	Fundamentos da análise modal.....	95
7.2	Análise espectral .....	96
7.3	Procedimento para construção de espectro conforme NBR 15421:2006 .....	99
7.3.1	Determinação de aceleração característica ( $a_g$ ).....	99
7.3.2	Determinação da classe do terreno.....	99
7.3.3	Determinação do espectro de resposta de projeto.....	100
7.4	Aplicação de análise sísmica espectral pela NBR 15421:2006 .....	102
7.4.1	Construção de espectro segundo NBR 15421:2006 .....	103
7.4.2	Estrutura modelo I .....	107
7.4.3	Estrutura modelo II .....	110
7.4.4	Análises entre modelos .....	112
7.4.5	Análises complementares .....	112
8.	CONCLUSÃO .....	115
	REFERÊNCIAS.....	117
	APÊNDICE A – Curvas de aceleração espectral <i>versus</i> período de retorno .....	123

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de aceleração horizontal característica do Brasil (NBR 15421:2006) .....	20
Figura 2: Mapa Global de Perigo Sísmico .....	21
Figura 3: Recorte do mapa mundial do projeto GSHAP.....	22
Figura 4: Mapa preliminar de perigo sísmico no Brasil com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (período de retorno de 475 anos). .....	23
Figura 5: Mapa preliminar de perigo sísmico no Brasil com probabilidade de excedência de 2% em 50 anos (período de retorno de 2.475 anos). .....	23
Figura 6: diferentes modelos de propagação de ondas: a) Ondas-P; b) Ondas-S; c) Ondas Rayleigh; e d) Ondas Love. ....	27
Figura 7 : Tipos de falhas: a) rejeito de mergulho; b) rejeito direcional; c) rejeito oblíquo. .....	29
Figura 8: Mapa de sismos em João Câmara e Falha de Samambaia.....	29
Figura 9: Etapas da análise probabilística de perigo sísmico.....	36
Figura 10: Tipos de fontes sísmicas. a) falhas b) áreas fonte c) área regional d) sismicidade difusa .....	39
Figura 11: Representação gráfica de GMPE para sismo com magnitude de 6,5 e probabilidade de PGA ser maior que 1g .....	45
Figura 12: Curva de distribuição Normal .....	47
Figura 13: Exemplo de curva de aceleração espectral <i>versus</i> taxa anual de excedência .....	48
Figura 14: Construção de espectro de resposta.....	51
Figura 15: Construção de espectro de resposta pela PSHA .....	53
Figura 16: Área-Fonte sísmica .....	54
Figura 17: Área-fonte discretizada em sub-regiões.....	55
Figura 18: Distâncias em relação ao centro da área fonte .....	56

Figura 19: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 0,5 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 2s$ ) x Período de Retorno.....	64
Figura 20: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 0,5 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 2s$ ) x Probabilidade de excedência. ....	64
Figura 21: Espectro de Resposta de Aceleração Espectral da região central do RN para período de retorno $T= 475$ anos ou probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	65
Figura 22: Espectro de resposta da região central do RN para lei de recorrência de Almeida (2002). ....	65
Figura 23: Espectro de resposta da região central do RN para lei de recorrência de Marza (S. I. apud Silva, 2009). ....	66
Figura 24: Espectros de resposta da região central do RN para cada lei de recorrência. ....	66
Figura 25: Área-fonte delimitada para a análise.....	67
Figura 26: Dados de entrada para áreas-fonte no R-CRISIS 18.4.2.....	68
Figura 27: Tela de R-CRISIS 18.4.2 para caracterização de sismicidade.....	69
Figura 28: Tela de R-CRISIS 18.4.2 para definição de ordenadas espectrais .....	70
Figura 29: Tela do R-CRISIS 18.4.2 para definição de GMPE.....	72
Figura 30: Tela do R-CRISIS 18.4.2 para escolha da GMPE.....	72
Figura 31: Curva $PE \times SA$ exibida pelo R-CRISIS 18.4.2.....	73
Figura 32: Curva $PE \times SA$ construída a partir de dados de saída disponíveis no R-CRISIS 18.4.2. Para PGA de probabilidades com tempo de exposição de 50 anos. ....	73
Figura 33: Tela do R-CRISIS 18.4.2 para alterar parâmetros globais. ....	74
Figura 34: Espectro de resposta gerado pelo R-CRISIS 18.4.2.....	75
Figura 35: Comparação dos espectros gerados com o espectro de norma. ....	75
Figura 36: Combinação dos mapas de perigo sísmico do PILOT e PAIGH para construção do mapa final. ....	77
Figura 37: Fontes sísmicas definidas pelo projeto PILOT na região Andina. ....	78

Figura 38: Mapa de Perigo Sísmico do GSHAP para a América do Sul. PGA (em $m/s^2$ ) com 10% de excedência em 50 anos.....	79
Figura 39: Os três modelos de área-fonte distintos utilizados.....	80
Figura 40: Modelos de mapas de perigo a partir de técnicas de suavização. ....	81
Figura 41: Mapas de perigo sísmico de 2% e 10% de probabilidade de excedência em 50 anos propostos por Petersen et al. (2018b). ....	83
Figura 42: Mapa de perigo sísmico de 50% de probabilidade de excedência em 50 anos propostos por Petersen et al. (2018b). ....	84
Figura 43: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE de Toro et al. (1997). PGA (T=0 s) em g com 10% de probabilidade de excedência em 50 anos. ....	86
Figura 44: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE híbrida conforme Petersen et al. (2018a). PGA (T=0 s) em g com 10% de probabilidade de excedência em 50 anos.....	87
Figura 45: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE de Toro et al. (1997). PGA (T=0 s) em g com 2% de probabilidade de excedência em 50 anos. ....	88
Figura 46: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE híbrida conforme Petersen et al. (2018a). PGA (T=0 s) em g com 2% de probabilidade de excedência em 50 anos.....	88
Figura 47: Espectro da NBR 15421:2006 definido por três equações.....	101
Figura 48: Representação geométrica tridimensional da estrutura modelo I .....	102
Figura 49: Planta de forma da estrutura modelo I. ....	103
Figura 50: Representação geométrica tridimensional da estrutura modelo II. ....	103
Figura 51: Espectro de resposta de acordo com procedimento da NBR 15421:2006 em $m/s^2$ . ....	105
Figura 52: Tela de inserção dos pontos do espectro no TQS. ....	106
Figura 53: Tela do TQS para definição de taxa de amortecimento e método de combinação de respostas modais.....	106
Figura 54: Definição de modos e massa da estrutura no TQS.....	107

Figura 55: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 1 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 1s$ ) x Período de Retorno. ....	123
Figura 56: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 2,5 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 0,4s$ ) x Período de Retorno.....	123
Figura 57: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 5 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 0,2s$ ) x Período de Retorno.....	124
Figura 58: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 10 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 0,1s$ ) x Período de Retorno.....	124
Figura 59: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 25 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 0,04s$ ) x Período de Retorno.....	125
Figura 60: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 35 \text{ Hz}$ ou $T_{GMPE} = 0,029s$ ) x Período de Retorno.....	125
Figura 61: Curva Aceleração Espectral ( $T_{GMPE} = 0,0 s$ ) x Período de Retorno.....	126



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Escala de Intensidade Mercali Modificada (abreviada). .....	34
Tabela 2: Etapas do PSHA.....	35
Tabela 3: Máximas distâncias para identificação e caracterização de fontes sísmicas .....	38
Tabela 4: Avaliação de sismicidade da fonte sísmica. ....	57
Tabela 5: Coeficiente da GMPE de Toro, Abrahamson e Schneider (1997). ....	59
Tabela 6: Modelo de tabela usado para cálculo de aceleração espectral das sub- regiões variando a magnitude (frequência de 0,5Hz). ....	59
Tabela 7: Matriz de distribuição de acelerações espectrais das sub-regiões entre intervalos para cada magnitude escolhida (frequência de 0,5 Hz). ....	60
Tabela 8 : Número de eventos dentro de intervalos de aceleração espectral em 1.000.000 de anos (frequência de 0,5 Hz). ....	61
Tabela 9: Resultados de frequências e períodos de retorno (frequência de 0,5 Hz). ....	63
Tabela 10: Valores de entradas das ordenadas espectrais no R-CRISIS 18.4.2.....	71
Tabela 11: GMPE utilizadas para as fontes sísmicas. ....	85
Tabela 12: GMPE e pesos utilizados no modelo híbrido. ....	86
Tabela 13: Variação da proporção das dimensões e variações percentuais dos valores de aceleração de cada período do espectro de resposta.....	89
Tabela 14: Variação do coeficiente de variação de $\beta$ e diferenças percentuais dos valores de aceleração de cada período do espectro de resposta. ....	90
Tabela 15: Análise da influência da profundidade da fonte nas acelerações espectrais. .....	90
Tabela 16: Análise da influência da direção de mergulho nas acelerações espectrais. .....	91
Tabela 17: Análise da influência do intervalo de incerteza da $\mu$ nas acelerações espectrais.....	92
Tabela 18: Pares $K_1$ e $K_2$ estabelecidos no R-CRISIS.....	92

Tabela 19: Análise da influência do valor dos parâmetros K1 e K2 nas acelerações espectrais.....	93
Tabela 20: Análise da influência do valor “Strike” nas acelerações espectrais. ....	94
Tabela 21: Classe do terreno de acordo com a NBR 15421:2006 (Tabela 2).....	100
Tabela 22: Fatores de amplificação do terreno. ....	100
Tabela 23: Pontos do espectro inseridos no TQS.....	105
Tabela 24: Parâmetros modais na direção X. ....	108
Tabela 25: Parâmetros modais na direção Y. ....	108
Tabela 26: Comparação de esforços internos devidos ao sismo e ao vento a 0° e a 90° nos pilares da estrutura modelo I.....	109
Tabela 27: Comparação de esforços internos devidos à ação de sismo e vento a 0° e a 90° em vãos de vigas da estrutura modelo I. ....	109
Tabela 28: Parâmetros modais na direção X. ....	110
Tabela 29: Parâmetros modais na direção Y. ....	110
Tabela 30: Comparação de esforços internos devidos ao sismo e ao vento a 0° e a 90° nos pilares da estrutura modelo II.....	111
Tabela 31: Comparação de esforços internos devidos à ação de sismo e vento a 0° e a 90° em vãos de vigas da estrutura modelo II. ....	111
Tabela 32: Valores médios das diferenças percentuais obtidas entre os modelos I e II (modelo II como referência).....	112
Tabela 33: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nos pilares P1 e P2 com espectro calculado segundo metodologia da NBR 15421:2006. ....	113
Tabela 34: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nas vigas V1 e V4 com espectro calculado segundo metodologia da NBR 15421:2006. ....	113
Tabela 35: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nos pilares P1 e P2 com espectro calculado pela PSHA para solo rochoso.....	113

Tabela 36: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nas vigas V1 e V4 com espectro calculado pela PSHA para solo rochoso.....	114
--	-----

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Tema e motivação

A preocupação formal com sismos no Brasil é algo relativamente recente, prova disso é que, apesar de haver alguns dados históricos esparsos, apenas na década de 70 passou-se a registrar os sismos de forma sistemática com instalação de estações sismográficas em diversas partes do país.

A pouca atenção que foi dada a esses eventos no território brasileiro pode ser devido à posição geográfica e geológica aparentemente privilegiada do país. Segundo Assumpção et al. (2016, p. 25), “o Brasil, por estar no meio de uma placa tectônica, longe de suas bordas, é uma região muito mais estável do que países andinos como Chile, Peru, Equador e Colômbia”. Isto contribui para que a atividade sísmica no país seja pouco recorrente e, no geral, de baixa magnitude. Porém ela não deve ser, de maneira nenhuma, desprezada, uma vez que, quando eventos como esse acontecem, tendem a ser devastadores, acima de tudo quando não há uma preparação (no sentido técnico, político, econômico e social) do país afetado. Isso acontece pois, nestes locais, os focos dos eventos sísmicos são pouco profundos.

Ademais, o estado do Rio Grande do Norte tem se mostrado como uma região de sismicidade bastante ativa se comparado com o restante do país. Dados obtidos no catálogo histórico divulgado pela Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) em 2014 mostraram que cerca de 14,7% dos sismos registrados são no RN, sendo um número bastante expressivo para um território tão pequeno em relação à área do Brasil (o estado representa cerca de 0,6% da área territorial de todo país). O estado só tem menos registros do que o CE, que apresenta 17,11%.

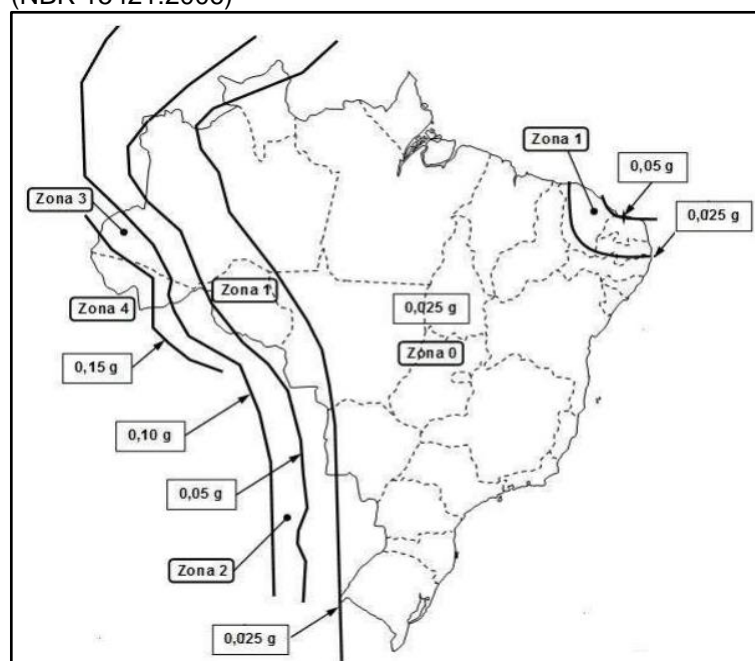
Diante da realidade exposta anteriormente, observa-se que se faz cada vez mais necessário antever e preparar-se para esse tipo de evento que, mesmo sendo pouco recorrente, pode ser catastrófico. Assim, é importante que o Brasil esteja munido de ferramentas que sirvam de subsídios para preparar a sociedade e a engenharia com relação a sismos de maior potencial destrutivo.

Uma dessas ferramentas disponíveis ao meio técnico é a ABNT NBR 15421:2006 que “[...] fixa os requisitos exigíveis para verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente às ações de sismos [...]” (ABNT

NBR 15421:2006, p. 1). Essa norma técnica prevê um mapa de perigo sísmico (Figura 1) que divide o Brasil em cinco zonas (Zona 0 a Zona 4) e cada uma delas apresenta diferentes acelerações do solo com 10% de probabilidade de ocorrer em 50 anos, equivalendo a um período de retorno de 475 anos. Observa-se que a maior parte do Brasil se encontra na Zona 0, na qual não é necessária nenhuma exigência de resistência com relação a sismos. O RN, por sua vez, insere-se na Zona 1, na qual a NBR 15421:2006 prevê a possibilidade de aplicação de um método bastante simplificado para levar em conta a ação de sismos em estruturas, através da consideração de uma força horizontal em cada pavimento de valor numérico igual a 1% da carga vertical do pavimento.

Paras as Zonas 2, 3 e 4, é permitido fazer a análise da estrutura pelo Método das Forças Horizontais Equivalentes ou ainda pelo Processo Espectral ou pelo Método do Histórico da Aceleração no Tempo (análises transientes), sendo estes últimos dois processos mais rigorosos.

Figura 1: Mapa de aceleração horizontal característica do Brasil (NBR 15421:2006)

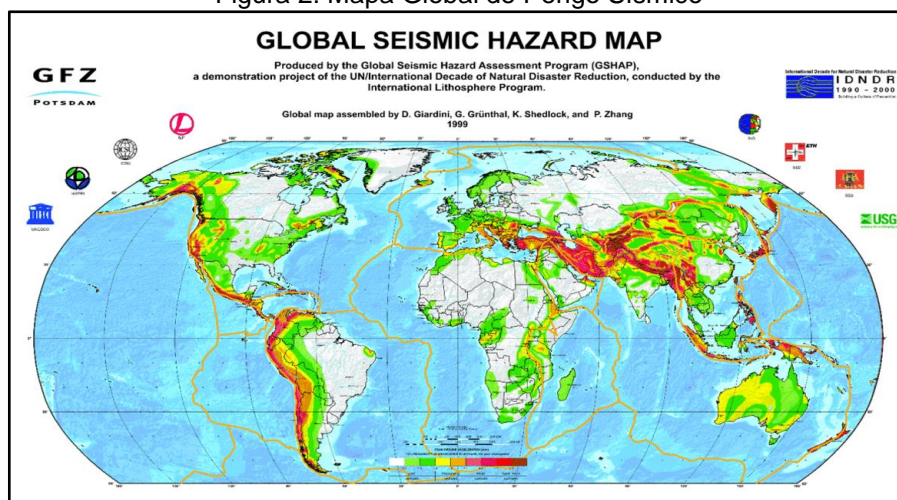


Fonte: ABNT NBR 15421:2006

O mapa de aceleração horizontal característica atualmente proposto para o Brasil (Figura 1), que equivale a um mapa de perigo sísmico, foi baseado em um

levantamento mundial de um projeto chamado de GSHAP<sup>1</sup> (Figura 2), realizado na década de 90, podendo ser constatado pela semelhança entre ambos (Figura 1 e Figura 3). Porém, novos estudos em todo o Brasil têm proposto mudanças no mapa de perigo sísmico da NBR 15421:2006, pois se observa que este não tem correspondido bem à realidade do país, subestimando a ação sísmica de algumas regiões (ASSUMPÇÃO et al., 2016; NÓBREGA & NÓBREGA, 2016; VASCONCELOS, 2010).

Figura 2: Mapa Global de Perigo Sísmico

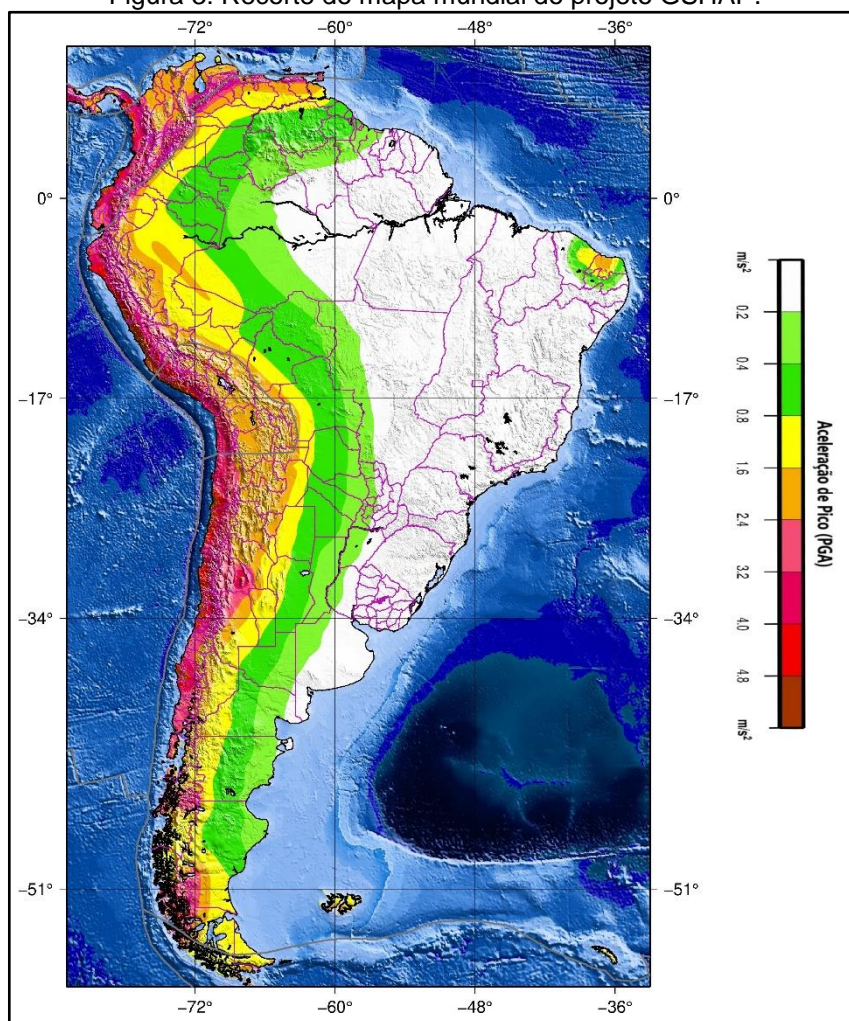


Fonte: <<https://www.gfz-potsdam.de/en/GSHAP/>>. Acesso em 15 de set. de 2018

Diante dessa problemática, estudiosos têm unido esforços para elaborar um novo mapa de perigo sísmico que fornecerá ao meio técnico um subsídio mais seguro e mais próximo da realidade para os projetos de estruturas civis. Um esboço de novo mapa já foi divulgado (Figura 4), ainda não em versão final, mas os resultados preliminares já tem mostrado que, para uma taxa de 10% de probabilidade de uma dada magnitude ser ultrapassada em 50 anos (a mesma utilizada no estudo do GSHAP), incorreu-se em um aumento dos valores de aceleração em relação ao mapa da NBR 15421:2006 para o mesmo período de retorno considerado, principalmente nas regiões mais centrais do Brasil. Em regiões dentro do RN observa-se também que as acelerações chegam a 0,2g nessa nova proposta, sendo 4 vezes maior que o mapa estabelecido pela NBR 15421:2006.

<sup>1</sup> *Global Seismic Hazard Assessment Project* – Projeto Global de Avaliação de Perigo Sísmico, em tradução livre.

Figura 3: Recorte do mapa mundial do projeto GSHAP.



Fonte: Adaptado de site do GSHAP<sup>2</sup>

Além disso, é importante citar que outro mapa de perigo (Figura 5), também elaborado por Assumpção et al. (2016), com uma menor probabilidade de excedência (2% em 50 anos ao invés de 10%) e, conseqüentemente, maior período de retorno (calculado em 2.475 anos, sendo superior aos 475 anos da atual proposta de mapa). Dessa forma, é evidente que esse segundo mapa é mais rigoroso que o primeiro, proposto pelos mesmos autores, e, por isso, os valores de aceleração deste último são maiores.

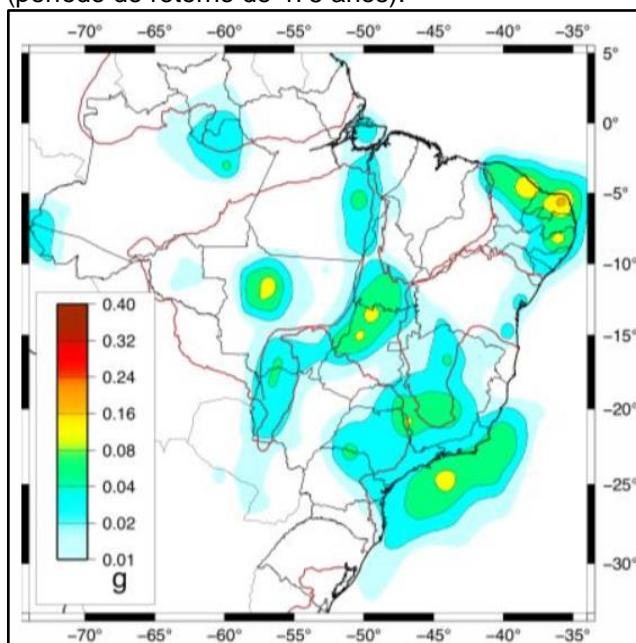
Entretanto, os mapas de perigo sísmico, por si só, passam informações apenas acerca dos sismos, sem levar em conta outros aspectos importantes para os projetos de estruturas resistentes a esse tipo de evento natural. Dessa forma, o risco sísmico

<sup>2</sup> Disponível em: <[http://gmo.gfz-potsdam.de/pub/GSHAP\\_Map\\_Online/gshap\\_map\\_online\\_frame.html](http://gmo.gfz-potsdam.de/pub/GSHAP_Map_Online/gshap_map_online_frame.html)>. Acesso em: 06 mai. 2019.



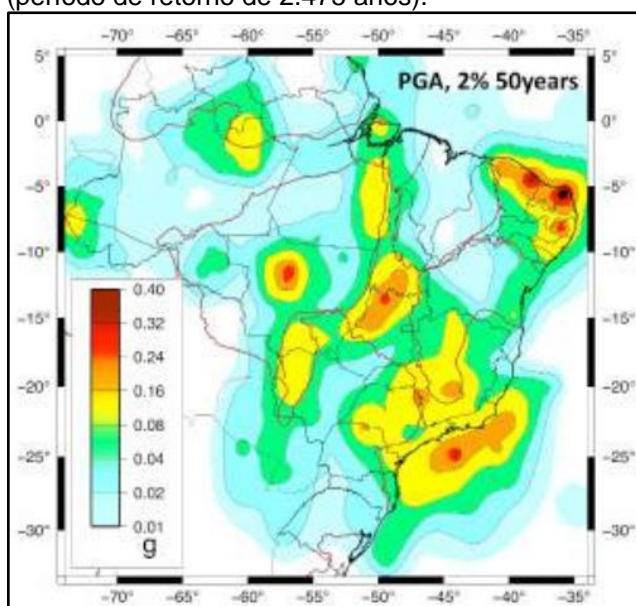
integra os níveis de sismicidade de uma região com os danos que estes podem causar, servindo como um melhor subsídio para decisões acerca da segurança sísmica da estrutura. Normalmente, ele é avaliado em termos de custos, perdas ou danos materiais e humanos advindos de um evento sísmico.

Figura 4: Mapa preliminar de perigo sísmico no Brasil com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (período de retorno de 475 anos).



Fonte: Adaptado de Assumpção et al. (2016)

Figura 5: Mapa preliminar de perigo sísmico no Brasil com probabilidade de excedência de 2% em 50 anos (período de retorno de 2.475 anos).



Fonte: Adaptado de Assumpção et al. (2016)



## **1.2 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho busca estudar os conceitos envolvidos na análise de perigo sísmico, bem como sua aplicação na construção de espectros de resposta e nos mapas de perigo sísmico.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Estudar e compreender a metodologia de construção do mapa de perigo sísmico;
- Estudar e compreender metodologia de construção de espectros de projeto a partir da análise de perigo sísmico;
- Analisar as propostas de mapa de perigo sísmico do Brasil;
- Aplicar a análise sísmica com espectros de resposta (obtidos conforme a metodologia da NBR 15421:2006) a estruturas e estudar seu comportamento;

## **1.3 Organização da monografia**

Esta monografia está dividida em oito capítulos. No primeiro estabelece-se uma discussão inicial sobre o assunto do trabalho apresentando o tema e motivação, bem como os objetivos geral e específicos pretendidos.

O segundo capítulo embasa o leitor para os assuntos que serão discutidos posteriormente na monografia. Assim, ele aborda conceitos iniciais de sismos e sismicidade explicando também as formas de propagação das ondas sísmicas. Ademais, apresenta os importantes conceitos da engenharia sísmica relacionados com este trabalho: perigo, vulnerabilidade, exposição e risco sísmicos. Por último, explana brevemente sobre as escalas de magnitude e intensidade.

O terceiro capítulo versa sobre os conceitos da análise probabilística de perigo sísmico, explanando sobre as principais etapas que o compõe. O foco do capítulo, entretanto, está nas etapas de caracterização de sismicidade e na caracterização do movimento do solo devido à vibração ocasionadas pelos sismos. Posteriormente,

mostra como todas as informações são integradas para se determinar o perigo sísmico.

O quarto capítulo trata da metodologia para construção de espectros de respostas usando a PSHA. Neste são mostrados dois procedimentos distintos: um manual e outro por meio do *software* R-CRISIS 18.4.2. Em ambos mostrou-se como cada passo dos procedimentos estava relacionado com as etapas do PSHA do terceiro capítulo.

O quinto capítulo busca analisar as principais propostas de mapas de perigo sísmico para o Brasil expondo alguns dos aspectos (tipos de fonte sísmica, leis de recorrências, GMPEs etc.) mais importantes usados para realizar as análises probabilísticas de cada uma delas. Foram avaliadas as propostas do GSHAP (base para o mapa vigente na NBR 15421:2006), de Assumpção et al. (2016) e de Petersen et al. (2018a).

No sexto capítulo foram feitas algumas análises dos principais parâmetros usados no R-CRISIS 18.4.2 para estudar a influência de cada um deles na resposta final de acelerações espectrais resultantes da análise.

O sétimo capítulo desenvolve aplicações práticas realizando a análise de uma estrutura submetida a sismos pelo método espectral considerando o procedimento da NBR 15421:2006. Neste sentido, foi feito o estudo de duas estruturas modelo variando-se, principalmente, o número de pavimento entre elas. Em ambas foi aplicado o espectro de resposta da norma brasileira nos eixos ortogonais principais da estrutura. Os valores dos esforços do sismo foram comparados àqueles devidos ao vento.

Finalmente, oitavo capítulo apresenta as conclusões dessa monografia, portanto, apresenta uma discussão geral de fechamento dos principais temas abordados nesse trabalho.

## 2. CONCEITOS INICIAIS

### 2.1 Sismos e sismicidade intraplaca

Sismos são movimentos vibratórios do solo, produzidos por uma intensa liberação de energia de uma fonte, seja ela natural ou antrópica. Normalmente, costuma-se associar os eventos sísmicos a alguma atividade tectônica, pois estes são mais devastadores e afetam grandes regiões, porém existem ainda os chamados sismos induzidos que são aqueles provocados por alguma origem como explosões de minas, deslizamentos de terra, escavação de poços de petróleo e gás entre outros; e que, de forma geral, não alcançam grandes magnitudes.

O presente trabalho tem o objetivo de lidar com o primeiro tipo de sismo mencionado anteriormente, por isso quando forem mencionadas as palavras sismo, terremoto, tremor de terra ou palavras análogas, é importante ter em vista que se trata de sismos originados de interações geológicas de causas naturais. Mais especificamente, trata-se aqui de sismos intraplaca, uma vez que a região alvo deste documento compreende o território brasileiro.

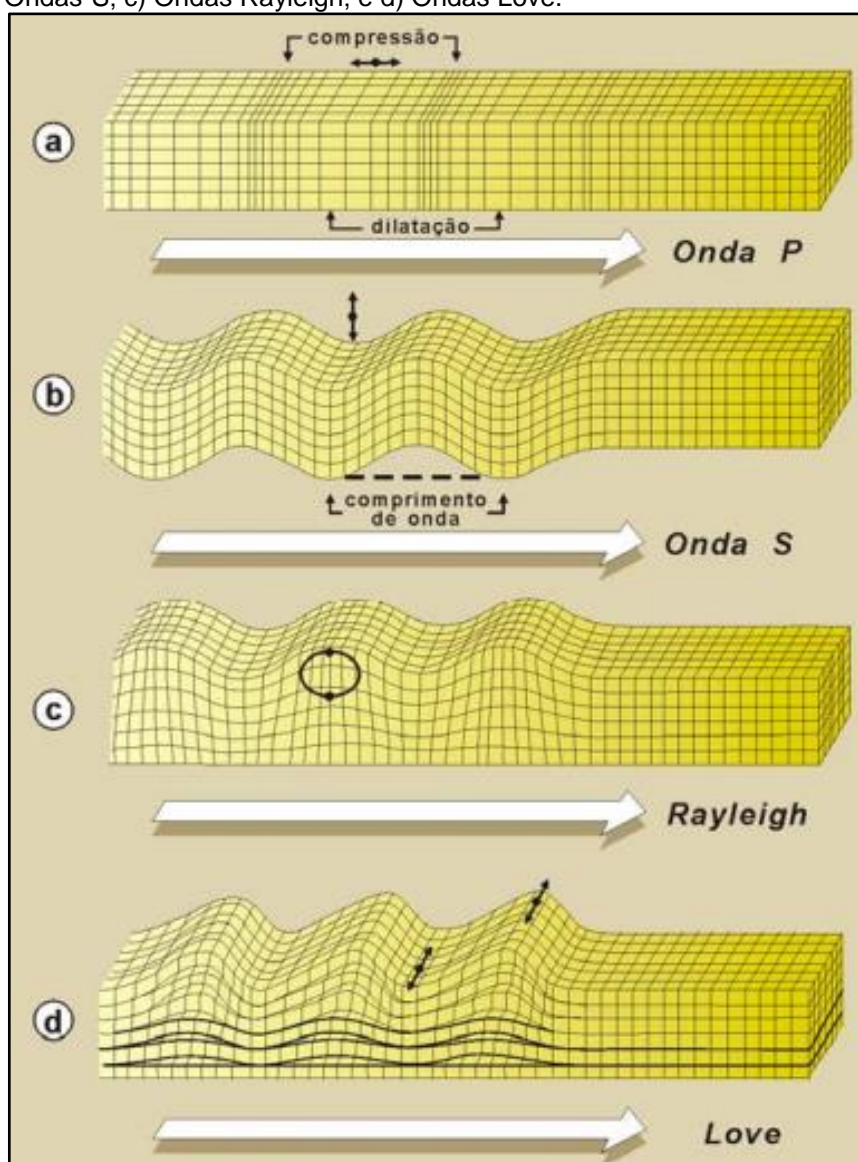
A origem dos sismos intraplaca é alvo de controvérsias entre os estudiosos da área, pois, segundo Assumpção et al. (2014), têm sido propostos diversas explicações distintas para explicar a causa desse tipo terremoto. Porém, as falhas (zonas de fraqueza) ativas tendem a ser uma das principais causas apontadas (o mecanismo será mais bem descrito posteriormente neste mesmo capítulo), pois estas provocam, ao se deslocarem, a propagação de ondas sísmicas (chamadas também de ondas elásticas) que, por sua vez, produzem as vibrações, sendo a principal causa dos danos causados na superfície.

Dentro deste contexto, existem alguns tipos diferentes de ondas sísmicas que se diferenciam pela forma e/ou meio de propagação característico de cada uma delas. As ondas-P (Figura 6 a) – sendo assim denominada, pois são as primeiras a serem registradas em um evento sísmico devido a sua velocidade de propagação – são aquelas que se propagam na direção longitudinal através de uma série de compressões e distensões do meio que pode ser sólido ou fluido, e, assim, faz com que a vibração das partículas do meio esteja na mesma direção que a onda percorre. As ondas-S (Figura 6 b) – chamadas também de ondas transversais – provocam o

movimento perpendicularmente à sua direção de transmissão e tendem a se propagar com facilidade em meios de maiores rigidezes não se propagando, entretanto, em meios fluidos, uma vez que este tipo de meio não oferecem resistência ao cisalhamento.

Há ainda as ondas cuja propagação se dá na superfície de corpos elásticos. Elas são de dois tipos: a *Rayleigh* (Figura 6 c) – ou ondas-R – que é uma mistura de onda P e S com movimento vertical e a *Love* (Figura 6 d) – ou ondas-L – que é a combinação do movimento da onda S com vibrações horizontais transversais à direção de propagação e nas regiões mais superficiais da Terra.

Figura 6: diferentes modelos de propagação de ondas: a) Ondas-P; b) Ondas-S; c) Ondas Rayleigh; e d) Ondas Love.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2009)

## 2.2 Falhas Geológicas

Falhas são estruturas geológicas que se apresentam em dois blocos separados por um plano (chamado plano de falha) em que, devido a isso, pode haver deslocamento relativo entre as partes e, conseqüentemente, ao ocorrer esse movimento, é liberada energia que poderá ocasionar o tremor do solo (terremoto). As falhas ativas são aquelas que apresentam alguma possibilidade de haver deslizamento entre as superfícies de seus blocos, havendo então ameaça de ocorrência de sismo na região. Entretanto, quando essas estruturas estão presentes em alguma região, sejam aparentes na superfície ou subsuperficial, não se pode afirmar necessariamente que esta é uma área passível de sismo, pois há a possibilidade que nelas não haja deslizamento entre os blocos que a compõe ou, ainda que ocorra esse deslizamento, pode ser que não haja liberação de energia suficiente para ocorrência de uma evento sísmico (LOAYZA, 2009).

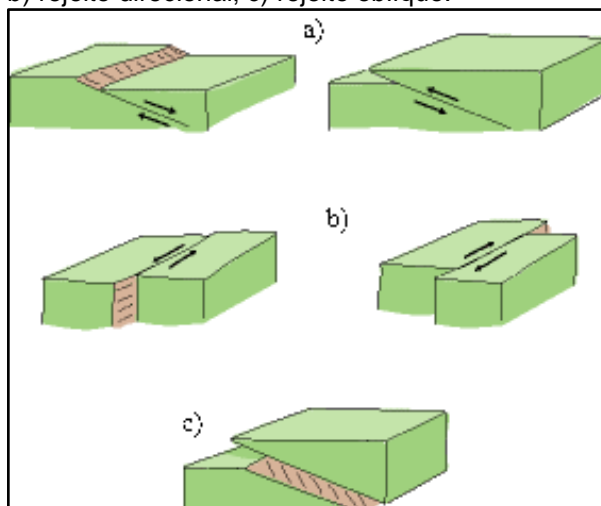
As falhas podem ser classificadas quanto ao tipo de rejeito que ocorre entre seus blocos adjacentes em três tipos principais (Figura 7): falha de rejeito de mergulho (“*dip-slip faults*”) (Figura 7a) em que o deslizamento tem direção paralela ao plano da falha; falha de rejeito direcional (“*strike-slip faults*”) (Figura 7b) em que o deslizamento ocorre longitudinalmente ao plano da falha; e, por último, aquelas em que o deslizamento é oblíquo na superfície de falha sendo, por isso, chamada de falha de rejeito oblíquo (“*oblique slip fault*”) (Figura 7c).

Segundo Bezerra, Ferreira e Nascimento (2016), muitas das falhas já mapeadas no Brasil apresentam importantes relações com ocorrência de sismos no território nacional. Corroborando com isso, Assumpção et al. (2016, p.30) observou que “a grande maioria dos sismos que ocorrem no Brasil está associada a algum tipo de falha geológica que é ativada, ou reativada, através da liberação de energia acumulada por algum processo tectônico”. Por isso, salienta-se aqui a importância da identificação e caracterização dessas estruturas.

No RN há presença de algumas delas das quais a mais conhecida é a Falha de Samambaia, tendo sido indicada como a principal causa dos sismos que acontecem nas proximidades de João Câmara no interior do estado. Essa falha foi identificada por Saadi et al. (2002) como sendo do tipo de rejeito direcional (“*strike-slip*”). A influência dessa falha na região de João Câmara é tal que se pode observar

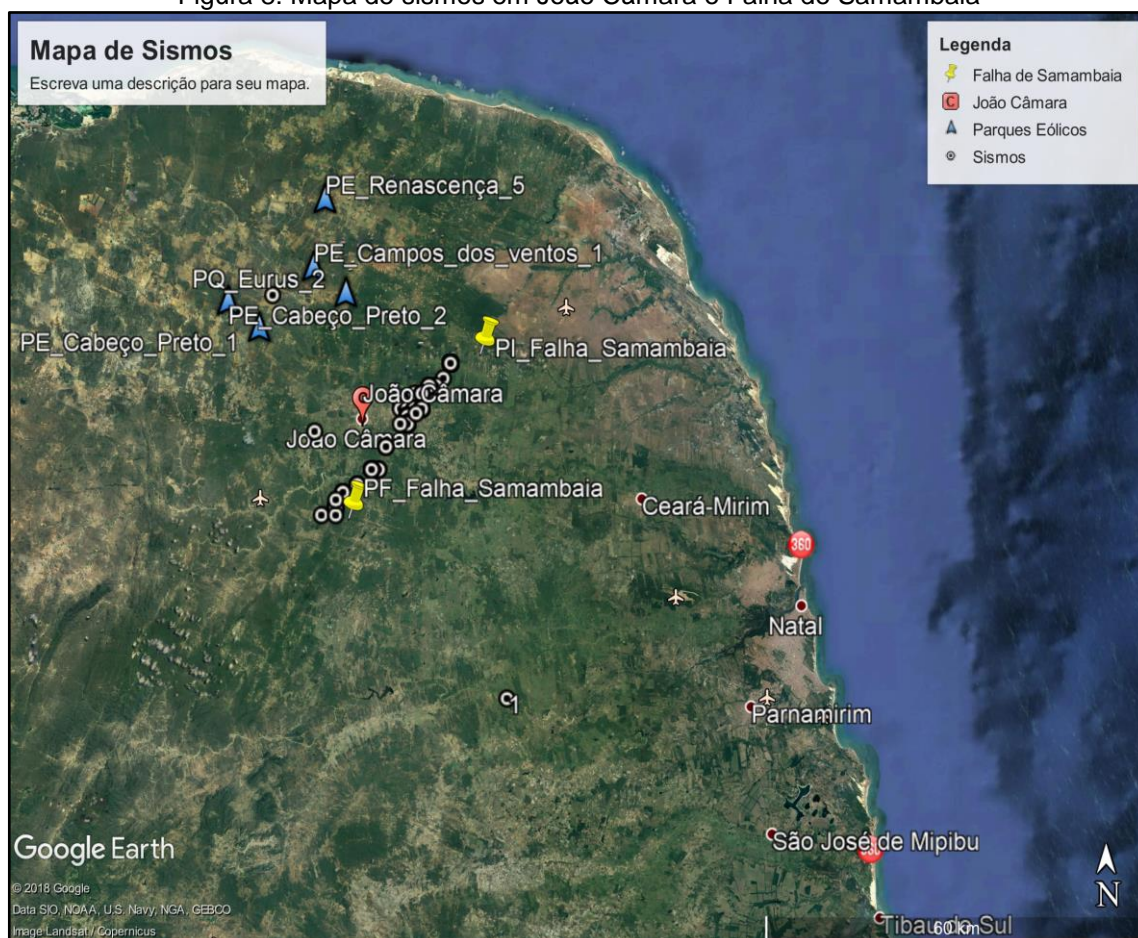
nesse local, eventos sísmicos com hipocentros sempre ao longo de uma linha com largura de não mais que três quilômetros e a profundidade é cerca de seis quilômetros (Figura 8), isto é, ocorrem próximos a superfície, por isso, se tornam perigosos.

Figura 7 : Tipos de falhas: a) rejeito de mergulho; b) rejeito direcional; c) rejeito oblíquo.



Fonte: Adaptado de Ammon (S. I.)

Figura 8: Mapa de sismos em João Câmara e Falha de Samambaia



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

### 2.3 Perigo Sísmico

O perigo de acontecer um evento qualquer está associado à perspectiva de ocorrência deste em um determinado local, mas não apenas isso, o termo “perigo” é relacionado a algo que potencialmente venha a causar danos. Assim, o perigo sísmico é definido, segundo Pirchiner (2014, p. 15), como “a possibilidade de ocorrerem efeitos potencialmente destrutivos de um terremoto em uma particular localização”.

Para analisar o perigo sísmico, duas abordagens podem ser tomadas. A primeira delas diz respeito a um tratamento determinístico que avalia cenários que podem ser causados pela ocorrência de um único evento sísmico definidos o local e magnitude deste (PIRCHINER, 2014; QUEIROZ, 2017; BAKER, 2013). A segunda forma de tratamento é a probabilística, que leva em conta diversos eventos sísmicos que podem afetar uma região de interesse. Isso é realizado através da caracterização de frequência de ocorrência de diversas magnitudes encontrando, então, a probabilidade de excedência relacionada ao nível de movimento do solo. Esta última será a abordagem do presente trabalho.

### 2.4 Vulnerabilidade Sísmica

O conceito de vulnerabilidade sísmica está ligado intrinsecamente aos prejuízos causados por um sismo às estruturas. Sendo assim, esse conceito pode ser mais bem definido como a “susceptibilidade [de uma estrutura] ao dano pelo terremoto de uma dada intensidade” (CALVI et al., 2006, p. 76). Com isto, a avaliação de vulnerabilidade sísmica tem o objetivo de estudar, para uma determinada estrutura (ou conjunto de estruturas em uma região), a probabilidade de ocorrer um certo nível de dano após um evento sísmico.

Assim, a vulnerabilidade está ligada a fatores técnicos de engenharia (geralmente, consequências diretas do desenvolvimento econômico e social), isto é, países menos desenvolvidos tecnicamente tendem a estar pouco preparados para sofrer terremotos. Isso pode ser exemplificado através do caso do Haiti, em 2010, que teve um abalo sísmico que alcançou magnitude de 7,0 Mw e causou a morte de mais de 200.000 pessoas. Comparativamente, o evento extremo ocorrido no Japão no ano de 2011, apesar de ter sido um dos maiores da história (chegando a magnitude 9,1 Mw, o que corresponde a aproximadamente 100 vezes mais energia liberada que o



sismo do Haiti), causou cerca de 16.000 mortes sendo a maioria delas provocadas pelo tsunami que se seguiu ao sismo.

As práticas de engenharia de um país implicam na forma como as estruturas são projetadas e executadas, ou não, para resistir a sismos. Fica claro, então, que as técnicas projetuais e construtivas de um país ou região influenciará diretamente no dano que as estruturas apresentarão após serem expostas a um sismo.

Adicionalmente, um outro fator importante relacionado à vulnerabilidade é a ocupação da região, isto é, a quantidade de pessoas que habitam nesse local. Assim, é fácil perceber que, se uma região com potencial sísmico tem maior concentração populacional, ela será mais vulnerável no sentido de que há maior possibilidade de haver vítimas. Esta variável é chamada muitas vezes de “exposição”.

Tendo isso em vista, observa-se a importância e a necessidade de se avaliar a vulnerabilidade sísmica. Entretanto, essa não é uma tarefa com uma única metodologia já consolidada; pelo contrário, o que tem sido observado nas literaturas são diversas metodologias elaboradas por diversos autores (por exemplo, aqueles citados por Calvi et al., 2006) cada qual com suas especificidades, vantagens e desvantagens. Devido a isso, separam-se tais metodologias em dois tipos principais: empíricas e analíticas.

Segundo Lang (2002), as metodologias empíricas podem ser feitas, geralmente, através de duas abordagens principais: ou por funções de vulnerabilidade ou através de matrizes de dano, as quais podem ser obtidas mediante análises estatísticas dos danos em construções em áreas afetadas por sismos ou por meio de análises numéricas. Já as abordagens analíticas, conforme Calvi et al. (2006), necessitam ter parâmetros de entrada e de saída com significados físicos objetivos e, por isso, podem servir de base para estudos paramétricos e não apenas para avaliar a susceptibilidade ao dano de uma região.

Dentro desse contexto, Miranda (2010) buscou avaliar a vulnerabilidade sísmica do Brasil com base no atual zoneamento sísmico proposto pela NBR 15421:2006. Para isso, o autor usou o método de Hirosawa ou também chamado de método Japonês sugerindo algumas modificações para adaptá-lo ao contexto brasileiro. As mudanças se concentraram principalmente no cálculo dos parâmetros



do índice de solitação sísmica ( $I_{s0}$ ) levando-se em consideração a equivalência desse com formulação do coeficiente sísmico ( $C_s$ ) da NBR 15421:2006.

## 2.5 Risco Sísmico

Segundo Pirchiner (2014) e Giovinazzi (2005), o risco sísmico é uma forma de relacionar as três variáveis comentadas anteriormente e que pode ser sinteticamente descrita como:

$$\text{Risco Sísmico} = \text{Perigo Sísmico} * \text{Vulnerabilidade} * \text{Exposição}$$

De forma geral, Giovinazzi (2005) define risco como a probabilidade de haver consequências negativas devidas a um evento perigoso (o sismo, por exemplo) que possa ocorrer em uma determinada unidade de área em um período de tempo específico. Desta feita, o risco sísmico busca retratar os prejuízos materiais e humanos devidos ao evento sísmico em uma região. Assim, pode-se perceber que, mesmo se um evento sísmico tiver alta magnitude (alto perigo sísmico), mas ocorrer, por exemplo, em uma ilha inabitada no meio do Pacífico (vulnerabilidade e exposição baixa) o local terá, então, baixo risco sísmico associado.

Finalmente, para explicar a relação perigo e risco sísmicos Nóbrega e Nóbrega (2016, p. 171) colocou seguinte ilustração:

O estudo do perigo sísmico é um passo inicial, e fundamental, para o posterior estudo do risco sísmico. Tem-se que o perigo é caracterizado por 3 parâmetros: o nível de perigo (a severidade), a sua frequência, e a localização. Já o risco é definido por 4 parâmetros: a probabilidade, o nível de severidade, o período de tempo e a localização. Dá-se um exemplo simples e hipotético, cotidiano, para ajudar a compreender estes conceitos: a cada mês acontece um acidente com vítima fatal no cruzamento da rua "A" com a rua "B"; este é o perigo. O risco significa que existe uma probabilidade de X% da pessoa vir a sofrer um acidente fatal no cruzamento da rua "A" com a rua "B", se ela utilizar esta avenida uma vez por dia, no período de 15 anos.

Dentro desse contexto, Miranda (2019) realizou uma reflexão geral sobre o risco sísmico no Brasil com particular ênfase na cidade de Fortaleza, CE. Segundo o autor, a cidade está em uma área de perigo sísmico considerável e, além disso, é um

local bastante populoso e adensado (exposição) com a presença de muitos prédios (vulnerabilidade). O conjunto desses fatores mencionados fazem com que a avaliação do risco sísmico seja um aspecto importante a ser analisado.

## 2.6 Escalas de magnitude e intensidade

As escalas de magnitude ou intensidade são formas comuns de qualificar ou quantificar os eventos sísmicos. As de intensidade sísmica tem caráter classificatório sendo inerente a ela o subjetivismo, pois está ligada às sensações e consequências observadas durante e após os eventos. A mais conhecida é a escala de Intensidade Mercalli Modificada (MMI), exibida na Tabela 1, que é dividida em doze classes diferenciadas entre si por meio de observações visuais e sensoriais dos efeitos do sismo (TEIXEIRA et al., 2009). Segundo McGuire (2004, p. 145), essa escala serve de base para estimar o risco sísmico, por meio de método empírico, isto é, dependem da interpretação do analista.

De forma oposta, a magnitude é uma medida mais direta do evento sísmico, isto é, ela é estabelecida com base em parâmetros objetivos tendo um valor numérico associado que quantifica o sismo. As escalas de magnitudes mais usadas são: a magnitude local,  $M_L$ , também conhecida como Escala Richter, que tem caído em desuso; a magnitude de onda de superfície,  $M_s$ , que é indicada para sismos com hipocentro em menor profundidade; a magnitude de ondas de corpo,  $M_b$ , usada para sismos profundos; a escala de magnitude regional ( $m_R$ ) que é, na verdade, uma adaptação da  $M_b$  para o Brasil e tem sido a mais empregada nas pesquisas e laboratórios sismológicos nacionais como meio de divulgar as informações sobre os sismos registrados, sendo sua validade para sismos mais profundos (entre 200 e 1500 km); e a escala de magnitude  $M_w$  que é baseada na medida do momento sísmico  $M_0$  relacionado com aspectos físicos ligados à liberação de energia que ocorre durante determinado evento. Segundo Loayza (2009), a vantagem deste último tipo de escala em relação à Richter reside no fato de que não há um limite máximo para ela (não atinge saturação) sendo, por isso, mais precisa para medir maiores terremotos. Diferentemente da escala regional, que têm sua medição calibrada tomando como base a máxima amplitude de um determinado sismo (magnitude zero) registrado por um sismógrafo específico.

Tabela 1: Escala de Intensidade Mercali Modificada (abreviada).

<b>Grau</b>	<b>Descrição dos Efeitos</b>	<b>Aceleração</b>
<b>I</b>	Não sentido. Leves efeitos de período longo de terremotos grandes e distantes	
<b>II</b>	Sentido por poucas pessoas paradas, em andares superiores ou locais favoráveis.	<0,003
<b>III</b>	Sentido dentro de casa. Alguns objetos pendurados oscilam. Vibração parecida à da passagem de um caminhão leve. Duração estimada. Pode não ser reconhecido como abalo sísmico.	0,004-0,008
<b>IV</b>	Objetos suspensos oscilam. Vibração parecida à da passagem de um caminhão pesado. Janelas, louças, portas fazem barulho. Paredes e estruturas de madeira rangem.	0,008-0,015
<b>V</b>	Sentido fora de casa; direção estimada. Pessoas acordam. Líquido era recipiente é perturbado. Objetos pequenos e instáveis são deslocados. Portas oscilam, fecham, abrem.	0,015-0,04
<b>VI</b>	Sentido por todas. Muitos se assustam e saem às ruas. Pessoas andam sem firmeza. Janelas, louças quebradas. Objetos e livros caem de prateleiras. Reboco fraco e construção de má qualidade racham.	0,04-0,08
<b>VII</b>	Difícil manter-se em pé. Objetos suspensos vibram. Móveis quebram. Danos em construção de má qualidade, algumas trincas em construção normal. Queda de reboco, ladrilhos ou tijolos mal assentados, telhas. Ondas em piscinas. Pequenos escorregamentos de barrancos arenosos.	0,08-0,15
<b>VIII</b>	Danos em construções normais com colapso parcial. Algum dano em construções reforçadas. Queda de estuque e alguns muros de alvenaria. Queda de chaminés, monumentos, torres e caixas d'água. Galhos quebram-se das árvores. Trincas no solo.	0,15-0,30
<b>IX</b>	Pânico geral. Construções comuns bastante danificadas, as vezes colapso total. Danos em construções reforçadas. Tubulação subterrânea quebrada. Rachaduras visíveis no solo.	0,30-0,60
<b>X</b>	Maioria das construções destruídos até nas fundações. Danos sérios a barragens e diques. Grandes escorregamentos de terra. Água jogada nas margens de rios e canais. Trilhas levemente entoadas.	0,60-1,0
<b>XI</b>	Trilhas bastante entortadas. Tubulações subterrâneas completamente destruídas.	~1,0-2,0
<b>XII</b>	Destruição quase total. Grandes blocos de rocha deslocados. Linhas de visada e níveis alterados. Objetos atirados ao ar.	~2,0

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2009)

### 3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE PERIGO SÍSMICO (PSHA)

#### 3.1 Considerações gerais

A PSHA é um método que inclui a incorporação das diversas incertezas envolvidas no problema de sismos nos próprios cálculos das probabilidades de ocorrência do evento. Se, por um lado, isso torna o processo de cálculo mais complexo, por outro, é o método de melhor aplicabilidade na engenharia, visto que seus resultados são mais seguros podendo, assim, servir como um bom subsídio para tomada de decisões (BAKER, 2013).

Queiroz (2017), divide a metodologia PSHA em quatro passos conforme mostrado na Tabela 2. A Figura 9 a seguir ilustra os passos da PSHA:

Tabela 2: Etapas do PSHA.

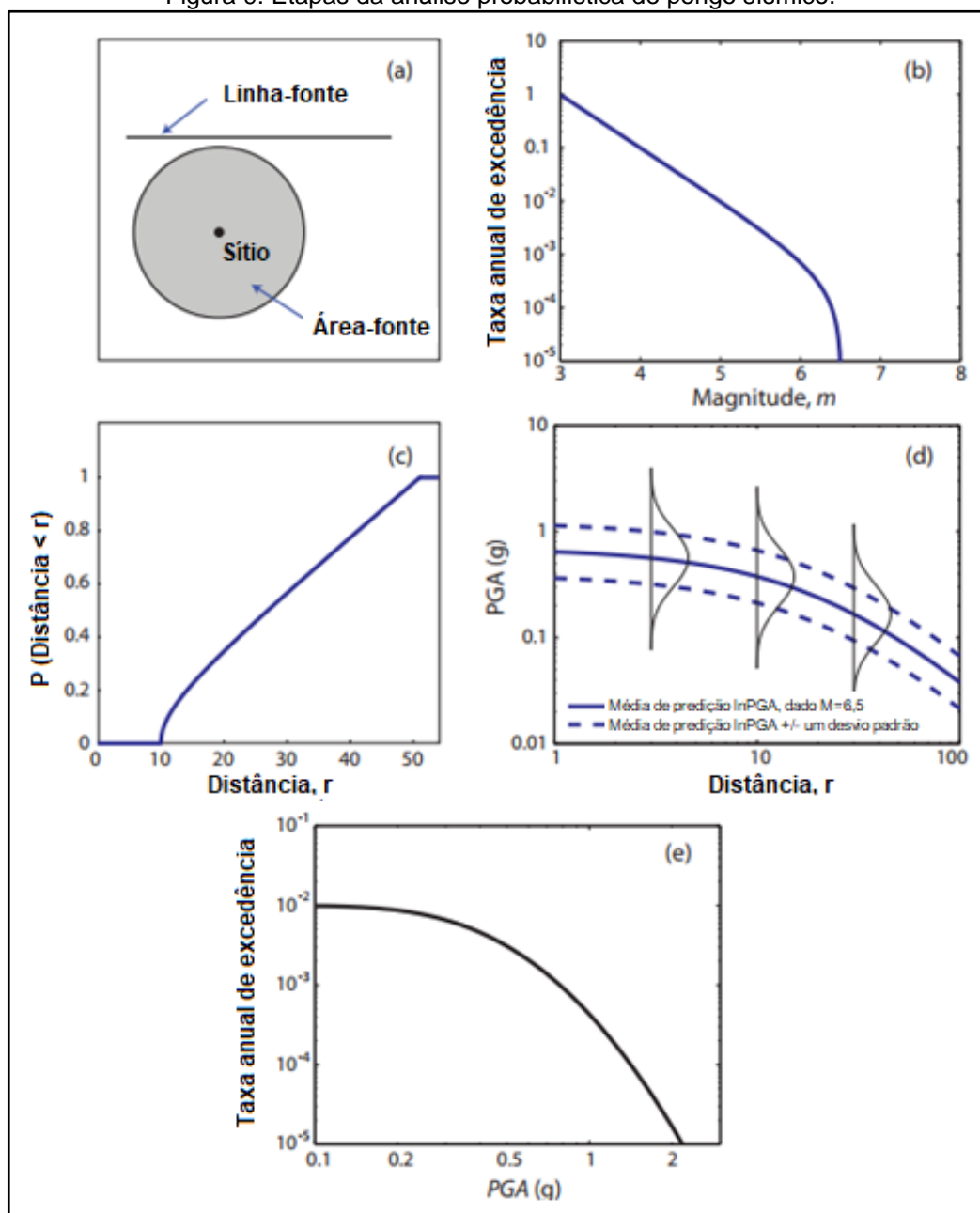
<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>1</b>	Identificação de fontes sísmicas, bem como sua caracterização, a partir de levantamentos histórico, tectônico e geológico - Figura 9 (a).
<b>2</b>	Determinação da sismicidade de cada fonte, através da caracterização das recorrências esperadas (ou leis de recorrência) para cada fonte determinando as magnitudes máximas e mínimas - Figura 9 (b) - e da caracterização da distribuição de probabilidade das fontes com relação à distância - Figura 9 (c).
<b>3</b>	Caracterização da distribuição das distâncias pelas equações de previsão de movimento do solo (GMPE <sup>3</sup> ou, como era chamada anteriormente, lei de decaimento do meio) de cada fonte - Figura 9 (d).
<b>4</b>	Integração das três variáveis citadas anteriormente e cálculo da probabilidade de excedência (objetivo da PSHA) e a consequente determinação do período de retorno - Figura 9 (e).

Fonte: Adaptado de Queiroz (2017)

---

<sup>3</sup> *Ground Motion Prediction Equations* – Equações de Previsão de Movimento do Solo, tradução livre.

Figura 9: Etapas da análise probabilística de perigo sísmico.



Fonte: Adaptado de Baker (2013)

### 3.2 Identificação e caracterização de fontes sísmicas

Segundo Budnitz et al. (1997, p. 53), fontes sísmicas são locais “da crosta terrestre que tem característica de sismicidade relativamente uniforme, e é distinta das fontes vizinhas”. Assim, para o cálculo do perigo sísmico é necessário que, primeiramente, sejam determinadas no local de análise todas essas fontes capazes de produzir alguma energia que gere vibração do solo. Para isso, é necessário realizar um levantamento histórico da região em análise para definição dos pontos em que normalmente os eventos ocorrem.

Nas regiões intraplaca, a identificação da fonte sísmica pode ser bastante complexa e, segundo Almeida (2002, p. 14), a “caracterização da fonte sísmica é extremamente dependente do ambiente tectônico considerado, o que a torna uma tarefa difícil para regiões de baixa sismicidade”, pois não existe “[...] nítida correlação entre a sismicidade e as estruturas tectônicas conhecidas ou a geologia superficial”.

A esse respeito, Budnitz et al. (1997) estabelecem três aspectos gerais para caracterização das fontes sísmicas de uma região de estudo. O primeiro consiste na definição da localização e geometria das fontes sísmicas por meio da observação de áreas em que há certa uniformidade de características sísmicas, por exemplo: em uma região de estudo pode existir mais de uma falha identificada em que cada uma apresenta certas características distintas como a forma de “escorregamento” entre as superfícies das falhas resultando em comportamento sísmico distinto para cada uma dessas fontes. Por isso, se faz necessário, na aplicação da PSHA, uma equipe multidisciplinar composta por sismólogos, geólogos, geofísicos, entre outros, com o objetivo de aplicar cada campo de conhecimento e, assim, desenvolver uma melhor caracterização da área.

Neste tópico, surge a discussão sobre até que distância da região de análise as fontes sísmicas devem ser consideradas como sendo relevantes para aquele local, tendo em vista a atenuação da amplitude do tremor de terra provocado pelo sismo. Budnitz et al. sugeriram valores-base para a região leste dos Estados Unidos (ver Tabela 3) que podem servir como balizadores para estudos brasileiros, uma vez que nesta localidade dos EUA a característica é de baixa sismicidade, tal qual ocorre no Brasil e no RN. Esse valor de distância máxima foi de 500 km. Isto é, para os autores, as fontes sísmicas distantes até 500 km da região devem ser detalhadas. Porém, o nível de detalhamento na caracterização da fonte deve ser diferente: as mais próximas devem ser mais detalhadas que as mais distantes. Isto é importante no sentido de se poupar esforços demais em fontes que são pouco relevantes para a região de análise.

O segundo aspecto é a determinação da máxima magnitude que cada fonte pode gerar sendo este um parâmetro importante para delimitar a lei de recorrência de sismos (esse conceito será ampliado posteriormente nesta mesma seção).

Por último, o terceiro aspecto (podendo-se dizer que é o alvo final desta etapa da PSHA) é a definição de lei de recorrência para cada fonte identificada que nada mais é do que uma função matemática que define a frequência de ocorrência de cada

magnitude considerada dentro dos limites definidos. Neste ponto, é importante que haja, para regiões de baixa sismicidade como o Brasil, um acervo de dados sísmicos adequados, uma vez que as “taxas de recorrência são derivadas quase que exclusivamente de dados sísmicos observados” (BUDNITZ et al., 1997, p. 52).

Além disso, nesta etapa, busca-se caracterizar essas fontes em relação à sua localização, tamanho e frequência de eventos sísmicos que poderão ocorrer posteriormente. Obter tais dados é uma tarefa complexa sendo, por isso, necessário avaliar a taxa de ocorrência de eventos passados e usá-la como indicador de probabilidade de eventos futuros (BUDNITZ et al., 1997).

Tabela 3: Máximas distâncias para identificação e caracterização de fontes sísmicas

		Distância da fonte à região de análise (km)
<b>Máxima distância para identificação de fontes</b>		500
<b>Distâncias para maior detalhamento na caracterização de fontes</b>	<i>Locais com falhas que distam menos de 50 km</i>	200
	<i>Locais com falhas que distam mais que 50 km</i>	300

Fonte: Adaptado de Budnitz et al. (1997)

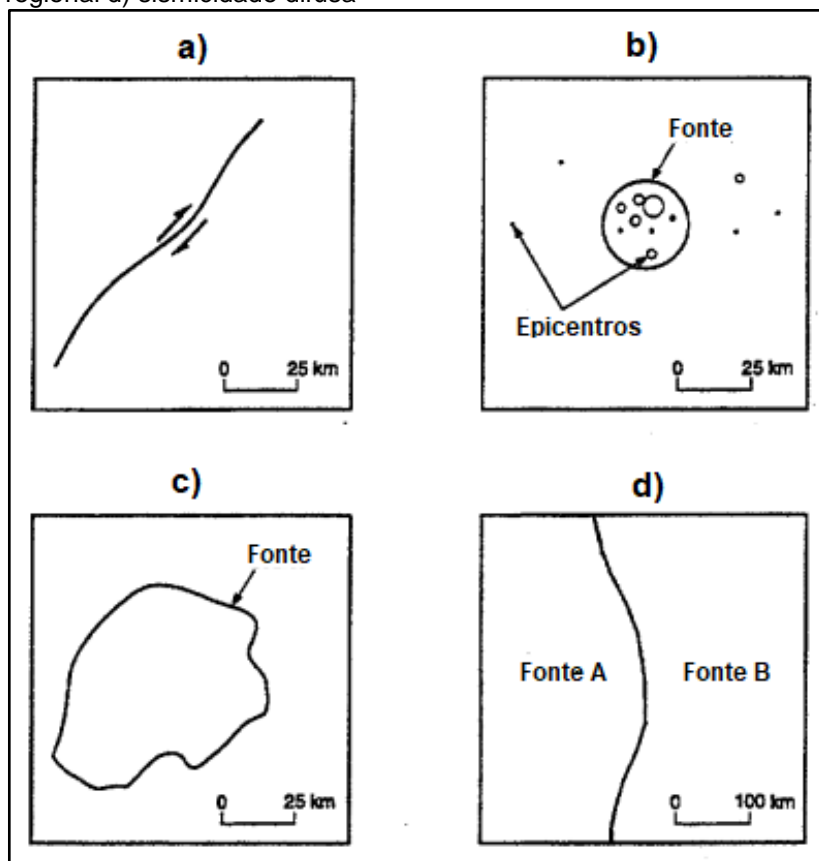
Com relação aos tipos de fontes sísmicas, Budnitz et al. classificam essas fontes em 4 tipos distintos (Figura 10):

- As falhas, que são representadas por linhas ou planos
- As áreas fonte, que consideram diversas zonas de sismicidade concentrada
- As fontes de áreas regionais
- As áreas de sismicidade difusa

Essa representação de uma fonte sísmica como sendo uma área (os três últimos tipos) é uma simplificação que comumente se adota em análise de perigo sísmico, pois sabe-se que a origem dos terremotos está ligada, de uma forma geral, ao deslizamento relativo entre dois blocos de uma determinada falha. Isso é necessário quando não há identificação apropriada da falha responsável por dar origem aos abalos sísmicos da região. Por isso, Budnitz et al. (1997, p. 55) afirmaram que as áreas-fonte homogêneas usadas na PSHA não são uma característica física

da crosta terrestre, mas são uma representação simplificada de uma ou mais estruturas sismogênicas de localização desconhecida.

Figura 10: Tipos de fontes sísmicas. a) falhas b) áreas fonte c) área regional d) sismicidade difusa



Fonte: Adaptado de Budnitz et al.(1997)

Uma das principais hipóteses adotadas nesta etapa é que essas fontes são independentes, isto é, um evento sísmico que ocorre em uma delas não interfere em outro de 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 poder obter expressões estatísticas que tornem possível o cálculo e análise por esse método. A não adoção dessa hipótese tornaria muito mais complexa a análise, pois seria necessário obter informações das variáveis que fazem a relação de um sismo com outros que ocorreram numa mesma época, ou ainda, seria necessário determinar o quanto de um evento que ocorreu em uma data está relacionado com eventos passados, pois sabe-se que os sismos, dependendo da sua magnitude, podem até modificar parte da estrutura geológica de regiões próximas a ele.



Como comentado anteriormente, a caracterização das fontes sísmicas também depende da definição da lei recorrência de sismos que, segundo Baker (2013), segue uma relação log-normal tal como mostrado na Equação 1:

$$\log \lambda_m = a - b * m \quad \text{Equação 1}$$

Em que, os termos significam:

- $\lambda_m$  é a taxa de sismo (ou a quantidade de eventos por ano – também representado por  $\sum N$ ) com magnitudes maiores ou iguais a um mínimo  $m$
- $a$  e  $b$  são coeficientes que dependem das características de cada local e são determinados a partir de análises estatísticas de observações históricas que são obtidas por meio de catálogos divulgados por órgãos que realizam os registros de sismos.

A obtenção dos parâmetros  $a$  e  $b$  é algo complexo e a abordagem sobre os métodos para tal foge do escopo deste trabalho. Assim, o que tem sido feito comumente em outros estudos sobre perigo sísmico é o uso de leis de recorrência com parâmetros já calibrados para a região analisado. Para a região Nordeste do Brasil, pode-se observar que o trabalho de Almeida (2002) usa a expressão com o valor  $a = 3,10$  e o valor  $b = 0,93$  (Equação 2), o de Marza (S. I. *apud* Silva, 2009), por sua vez, usa valores de  $a = 2,92$  e o valor  $b = 1,01$  (Equação 3) e o de Dourado (2014) adota  $a = 3,11$  e  $b = 0,96$  (Equação 4). É importante notar que os coeficientes de Marza são específicos para o Ceará, enquanto os demais são relativos a toda região Nordeste.

$$\log \lambda_m = 3,10 - 0,93 * m \quad \text{Equação 2}$$

$$\log \lambda_m = 2,92 - 1,01 * m \quad \text{Equação 3}$$

$$\log \lambda_m = 3,11 - 0,96 * m \quad \text{Equação 4}$$

Para a região Sudeste do Brasil pode-se observar que Almeida (2002) adota valores  $a = 4,44$  e  $b = 1,28$  (Equação 5); Dourado (2014) adota  $a = 3,9969$  e  $b = 1,3112$  (Equação 6) para áreas terrestres e, para áreas marítimas,  $a = 2,4759$  e  $b = 0,7629$  (Equação 7). As equações abaixo sintetizam o que foi anteriormente mencionado:

$$\log \lambda_m = 4,44 - 1,28 * m \quad \text{Equação 5}$$

$$\log \lambda_m = 3,9969 - 1,3112 * m \quad \text{Equação 6}$$

$$\log \lambda_m = 2,4759 - 0,7629 * m \quad \text{Equação 7}$$

Baker (2013) demonstrou, a partir da Equação 1, que a função de distribuição cumulativa ( $F_M$ ) de uma fonte sísmica – cujos sismos tem magnitudes maiores que um mínimo ( $m_{\min}$ ) fixado de acordo com algum critério (por exemplo, danos em estruturas civis) – é dada pela Equação 8.

$$F_M(m) = \frac{1 - 10^{-b(m-m_{\min})}}{1 - 10^{-b(m_{\max}-m_{\min})}}, \text{ com } m_{\min} < m < m_{\max} \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

- $m_{\max}$  é a maior magnitude que uma fonte pode produzir;
- $m_{\min}$  é a menor magnitude fixada para a fonte em análise.

A função de densidade de probabilidade ( $f_M$ ) associada à expressão anterior é tomada pela derivada da função de distribuição cumulativa. Assim, a expressão de  $f_M$  terá a forma

$$f_M(m) = \frac{b \ln(2 * 10) 10^{-b(m-m_{\min})}}{1 - 10^{-b(m_{\max}-m_{\min})}}, \quad \text{com } m_{\min} < m < m_{\max} \quad \text{Equação 9}$$

Segundo Almeida (2002), para localidades classificadas como áreas fonte a magnitude máxima é determinada pelos dados históricos de sismo da região. Assim, “é comum adicionar meia unidade de magnitude ou uma unidade de intensidade ao

sismo histórico de maior magnitude para representar o sismo de magnitude máxima dessa fonte” (Almeida, 2002, p.17).

Para o RN, estudiosos da área tem indicado que os maiores sismos podem ser considerados entre os valores 5,5  $m_b$  e 6  $m_b$  (magnitude regional) de acordo com o que se observa a partir dos dados sismológicos e geológicos da região, porém a ausência de tremores maiores que 6  $m_b$  ou 6,5  $m_b$  nos últimos 180 anos pode ser indicativo de uma provável recorrência de eventos dessa magnitude (OSTENAA, 1988 apud TORRES, 1994)<sup>4</sup>. Sendo assim, é razoável adotar a magnitude de 6,5  $m_b$  ou 7  $m_b$  para o estado.

### **3.3 Caracterização da distribuição de distâncias e do movimento do terreno através das GMPE (“*Ground Motions Prediction Equations*”)**

Das etapas analisadas na PSHA, a caracterização da distribuição de distâncias e do movimento do terreno é responsável por associar ao perigo sísmico, uma variável que esteja diretamente ligada aos danos (sociais, econômicos etc.) causados pelos abalos sísmicos, podendo ser algum parâmetro relativo à vibração ocasionada por esses eventos (deslocamento, velocidade ou aceleração).

McGuire (2004) observa que o movimento vibratório causado pela liberação de energia de um sismo é o principal responsável pelos prejuízos de ordem econômica ou social em eventos dessa natureza. Exemplos das consequências diretas relacionadas aos tremores provocados pelos sismos são: danos às estruturas naturais e artificiais que, por sua vez, podem causar danos humanos; tsunamis e posterior destruição de áreas costeiras habitadas; entre outras. Por isso, nessa etapa é muito importante a avaliação cuidadosa do analista para a correta inclusão de modelos que descrevam adequadamente o sismo em termos do movimento que este causa no terreno.

Assim, neste ponto da PSHA, busca-se quantificar um determinado parâmetro de movimento do terreno por meio da seleção ou dedução de um modelo matemático (GMPE) adequado para se fazer essa estimativa. Normalmente emprega-se o parâmetro de aceleração, entretanto este também poderia ser o deslocamento ou

---

<sup>4</sup> OSTENAA, D.. **Evaluation of seismic hazards Açú dam and reservoir Rio Grande do Norte, Brazil**. Denver: U. S. Bureau of Reclamation, 1988. 24 p.

velocidade. Porém, independente do parâmetro usado, sabe-se que eles são variáveis aleatórias e, assim, apresentam dispersão de valores em torno da média. Tendo isso em mente, Almeida (2002, p. 18) concluiu que devido a essa dispersão “[...] o parâmetro do movimento vibratório do terreno apresenta uma distribuição de probabilidade, caracterizada por valor médio e desvio padrão calculados através das relações de prognóstico”, sendo essas relações de prognóstico as equações de movimento.

Segundo Baker (2013), o modelo matemático para caracterização do movimento do terreno é calculado por meio de regressões estatísticas dos dados históricos de observações de um determinado parâmetro de movimento do terreno. Mesmo assim, é importante que haja a consciência de que esses modelos consistem em uma previsão com possibilidades de haverem resultados que excedam as maiores intensidades calculadas por eles ou ainda que os sismos se comportem no futuro de modo diferente do modelo que foi construído com base no comportamento histórico (passado). Isso se dá porque os sismos são fenômenos muito complexos em que há diversas variáveis envolvidas, muitas das quais não são fáceis de mensurar, e esses modelos usam apenas um número pequeno de variáveis, tais como magnitude, distância, aceleração, entre outras que tornam o processo com maiores quantidades de incertezas (BAKER, 2013).

Ademais, vale ressaltar que, segundo Bommer et al. (2010), não é necessário que o modelo ou os modelos matemáticos escolhidos sejam da mesma região em que se está analisando o perigo sísmico, entretanto, tem-se adotado modelos de locais com condições similares de sismicidade, ainda que estes tenham sido elaborados em regiões geograficamente distantes do local em que se está procedendo a análise do perigo sísmico, podendo-se citar o trabalho de Santos, Lima e Silva (2010) que usaram em sua análise para o Brasil uma GMPE calibrada para locais de baixa sismicidade nos EUA. Porém, é importante que o analista de perigo sísmico esteja ciente das limitações dos modelos escolhidos (McGUIRE, 2004) e que, quando determinados modelos são selecionados, o analista, de certa forma, está impondo que no futuro os sismos se comportarão de forma semelhante ao passado (usados para construção do modelo) e isso pode não ser necessariamente verdade.

Com isso, a função a seguir mostra que o modelo geral de predição de movimento do terreno toma a forma de uma função logarítmica com base natural, tal como se segue:

$$\ln Y = \overline{\ln Y}(m, r) + \sigma(m, r) * \varepsilon \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

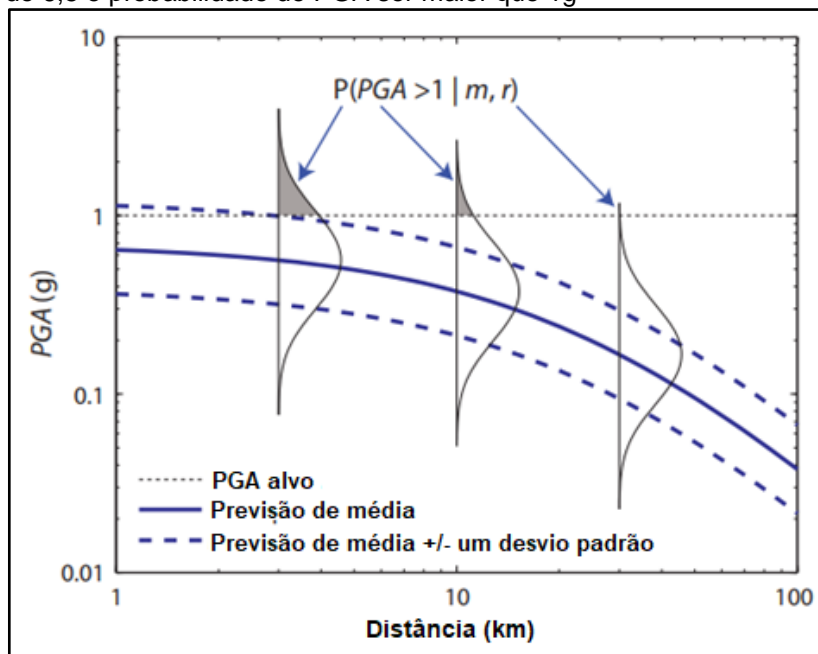
- $\ln Y$  é o logaritmo natural do movimento do terreno ( $Y$ ) definido para a análise.
- $\overline{\ln Y}(m, r)$  e  $\sigma(m, r)$  são respectivamente, a média prevista e o desvio padrão das observações que são funções da magnitude ( $m$ ) e da distância ( $r$ ), podendo ser também dependentes de outras variáveis.

O gráfico mostrado (Figura 11) por Baker (2013) é esclarecedor com relação às equações anteriores e mostra a aplicação dela. Na Figura 11, o traço contínuo representa os valores médios de aceleração de pico (é a máxima aceleração ocorrida de um dado evento sísmico chamada em inglês de “*Peak Ground Acceleration*” ou pela sigla *PGA*) dada por uma GMPE, para a qual é fixado um valor de magnitude e, assim, estuda-se o comportamento da aceleração (*PGA*) a partir da variação da distância do local de ocorrência do sismo. Observa-se que esta tem uma tendência decrescente, isto é, quanto maior a distância com relação ao epicentro, menores são as acelerações (para esse caso o parâmetro de análise são acelerações, porém poderia ser outro parâmetro como já foi discutido anteriormente) provocadas pelo sismo. Também, pode-se perceber na figura uma reta paralela às abcissas (eixo da distância) na altura de 1g que representa o valor definido pelo analista para avaliar a probabilidade de ocorrer valores acima dele.

Dessa forma, são mostradas, na Figura 11, as distribuições de probabilidade para três distâncias fixadas (3, 10 e 30 km), e pode-se concluir que quanto maior a distância menor é a probabilidade de um sismo ultrapassar um valor *PGA* definido. Essas duas observações podem ser verificadas na prática, pois é natural pensar que à medida que vai havendo o afastamento da fonte sísmica, menores serão os movimentos do solo observados, pois há uma dissipação da energia e, conseqüentemente, menores serão as probabilidades de ocorrerem tremores acima

de um nível determinado. Os traços curvos e pontilhados representam a variação que ocorre em torno da média, mostrando que, por se tratar de uma variável aleatória haverá sempre uma dispersão de resultados associados como já foi discutido.

Figura 11: Representação gráfica de GMPE para sismo com magnitude de 6,5 e probabilidade de PGA ser maior que 1g



Fonte: Adaptado de Baker (2013)

Assim, se a distribuição do parâmetro de movimentos analisado tende a seguir tendência log-normal, a probabilidade de ele ser ultrapassado  $P(Y \geq y_r^*)$ , fixados uma magnitude ( $m$ ) e uma distância ( $r$ ), é dada, segundo Almeida (2002), pela função complementar da distribuição log-normal mostrada a seguir:

$$P(Y \geq y_r^* | m, r) = 1 - \Phi(y_r^*) \quad \text{Equação 11}$$

Com a distribuição log-normal,  $\Phi(y_r^*)$ <sup>5</sup>, dada por:

<sup>5</sup> Essa expressão é muito comum na estatística e representa a probabilidade de não-excedência de um valor analisado ( $y$ ) em que o logaritmo deste apresente tendência a seguir a distribuição (ou também chamada de função de densidade de probabilidade) normal. Muitas vezes é representada por meio de tabelas que dependem apenas do valor reduzido ( $y_r^*$ ). Para mais informações pode-se consultar bibliografias especializadas em probabilidade e estatística.

$$\phi(y_r^*) = \int_{-\infty}^{y_r^*} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] dy \quad \text{Equação 12}$$

E a expressão de  $y_r^*$ :

$$y_r^* = \left( \frac{\ln y^* - \overline{\ln(y)}}{\sigma_{\ln y}} \right) \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

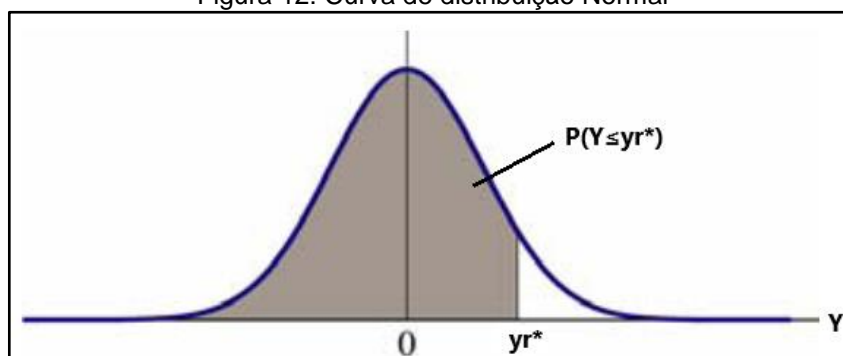
- $y^*$  é o valor do parâmetro do movimento do solo
- $y_r^*$  é o valor reduzido do parâmetro do movimento do solo.

A Equação 12 é a expressão da curva de distribuição de probabilidade normal que tem a forma gráfica da Figura 12 e avalia a probabilidade de uma variável aleatória assumir valor menor ou igual que ( $y_r^*$ ).

No Brasil, há carência de estudos que busquem desenvolver equações de previsão de movimento do solo. Também, aliado a isso, por motivos já discutidos, há, relativamente, pouco acervo de dados de sismos, sendo mais difícil a elaboração de bons modelos. Em casos como esse, McGuire (2004) sugere, entre outros aspectos, o uso de analogias com regiões similares. Apesar do autor citado não definir bem como realizar essa analogia, têm sido empregadas para o Brasil equações de estudos de outros países, levando-se em consideração que estes modelos sejam de locais com características e comportamento sísmicos semelhantes. Silva (2009) e Almeida (2002), por exemplo, usaram o modelo desenvolvido por Toro, Abrahamson e Schneider (1997) com os coeficientes que foram estabelecidos para regiões centrais (intraplaca) dos Estados Unidos sob a justificativa de que estas apresentam baixa sismicidade, tal como o Brasil.

Em um trabalho pioneiro na região do Rio Grande do Norte (RN), Dantas (2012) realizou um estudo com vistas a obter um modelo modificado de Toro, Abrahamson e Schneider (1997) para elaborar uma equação calibrada para acelerações de pico (PGA) horizontal e vertical para o estado. A expressão para aceleração horizontal resultou na Equação 14.

Figura 12: Curva de distribuição Normal



Fonte: Adaptado de Baker (2013)

$$\log Y_H = -0,22 + 0,74 M - 0,0023 R - 1,34 \log R \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

- $Y_H$  é a aceleração de pico horizontal em  $\text{cm/s}^2$
- $M$  é a magnitude regional, definida por Assumpção<sup>6</sup> (1989, *apud* DANTAS, 2012)
- $R$  é a distância hipocentral

### 3.4 Integrando as informações

O principal resultado da PSHA é a curva de aceleração espectral *versus* probabilidade de excedência ou taxa anual de excedência (Figura 13). Na prática, essa curva representa a probabilidade dos valores de aceleração serem superados em um sentido desfavorável.

Observa-se na Figura 13 que a forma da curva indica que a probabilidade é decrescente à medida que há o aumento da aceleração.

A probabilidade de excedência ( $PE$ ) é calculada segundo Baker (2013) através da expressão da Equação 15.

---

<sup>6</sup> ASSUMPÇÃO, Marcelo. A regional magnitude scale for Brazil. **Bulletin Of The Seismological Society Of America**, [s.i.], v. 73, n. 1, p.237-246, fev. 1983.

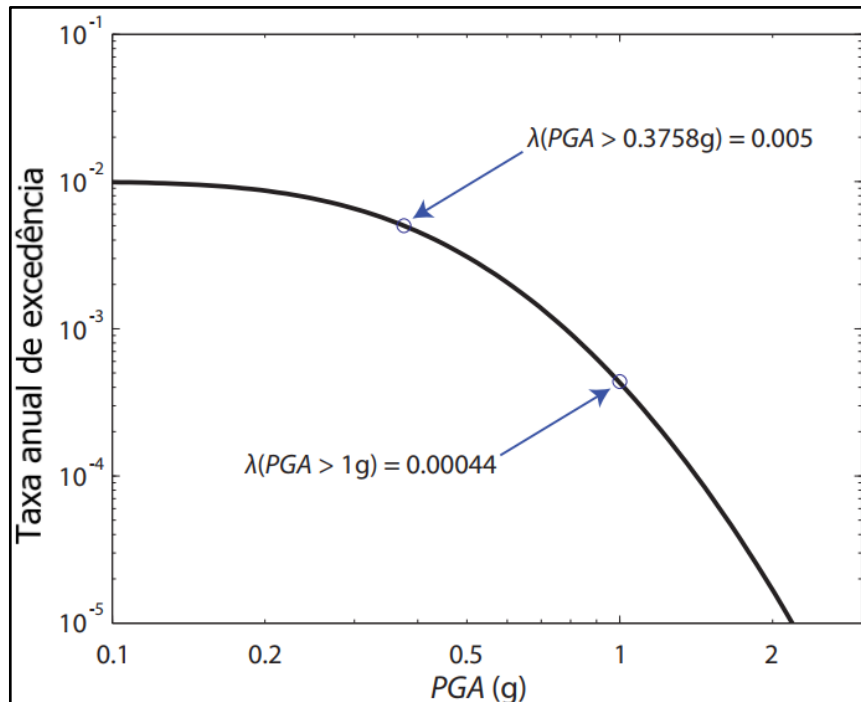


$$PE(Y > y) = \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(Y > y | m_j, r_k) P(M = m_j) P(R = r_k) \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

- $PE(Y > y | m, r)$  é a probabilidade de um parâmetro de movimento ( $Y$ ), que represente a vibração ocasionada pelo terremoto (aceleração é o mais comum na PSHA), ultrapassar um valor ( $y$ ). Este valor é obtido pela análise da GMPE nos intervalos de magnitude e distâncias definidos.
- $n_M$  e  $n_R$  são os números de intervalos de magnitude e de distâncias, respectivamente, em que são avaliadas as probabilidades;
- $P(M = m_j)$  é a probabilidade de a magnitude assumir um valor referente ao  $j$ -ésimo – entre 1 e  $n_M$  – intervalo;
- $P(R = r_k)$  é a probabilidade de a distância assumir um valor referente ao  $k$ -ésimo – entre 1 e  $n_R$  – intervalo.

Figura 13: Exemplo de curva de aceleração espectral versus taxa anual de excedência



Fonte: Adaptado de Baker (2013)

Segundo Baker (2013), essa probabilidade dada pela Equação 15 não fornece a informação da frequência em que terremotos ocorrem para cada fonte. Assim, surge o conceito de taxa anual de excedência que é sintetizado pela expressão matemática:

$$\lambda(Y > y) = \sum_{i=1}^{n_{fontes}} \lambda(M_i > m_{min}) \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(Y > y | m_j, r_k) P(M_i = m_j) P(R_i = r_k)$$

Equação 16

Em que:

- $\lambda(Y > y)$  é a taxa em que um parâmetro de movimento ( $Y$ ), que represente a vibração ocasionada pelo terremoto (aceleração é o mais comum na PSHA), ultrapassa um valor ( $y$ ).
- $\lambda(M_i > m_{min})$  é a taxa de ocorrência de eventos sísmicos maiores que um valor mínimo
- $n_{fontes}$  é o número de fonte sísmicas que interferem na região analisada.

A probabilidade de excedência (ou a taxa) é calculada para diversos valores do parâmetro de movimento, isto é, varia-se o  $y$  e determina a  $PE$  de cada um destes. Desta forma, constrói-se a curva semelhante à Figura 13 que toma essa forma quando ambos os eixos cartesianos estão em escala logarítmica.

## 4. METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE ESPECTROS DE RESPOSTA A PARTIR DA PSHA

### 4.1 Espectros de respostas

A NBR 15421:2006 define três tipos de análises estruturais que podem ser adotadas para avaliar os esforços resultantes na estrutura. A opção por um método em detrimento de outro está ligada, entre outros fatores, à grandeza da aceleração sísmica horizontal característica ( $a_g$ ), que, por sua vez, depende da zona sísmica de norma, tal como comentado no tópico 1.1.

Sabe-se que o sismo é uma ação dinâmica, isto é, o comportamento dela, no tempo, é variável. Dessa forma, os esforços devidos a um sismo também variam e, para analisá-los a cada momento, é necessário saber como o evento sísmico excitará a estrutura em toda a duração do tremor. Porém, esse tipo de análise, chamada de método da história no tempo, tende a ser um processo que gera bastante esforço computacional e tempo de processamento.

Assim, caso ainda possa ser admitido o regime elástico linear para a estrutura considerada, outro caminho é proceder à análise apenas dos maiores valores que o sismo submete à estrutura em todo o tempo de sua duração. Desta maneira, podem-se determinar os máximos valores de resposta da estrutura em regime linear (físico e geométrico). Tal método é chamado de análise espectral e tem sido “o procedimento mais divulgado de caracterização da ação sísmica, é a representação utilizada nas normas sísmicas internacionais de cálculo estrutural” (BRITO, 2017, p.17).

Os espectros de respostas são gráficos que representam os valores máximos de resposta (devido a uma ação dinâmica qualquer) de osciladores simples (com um grau de liberdade, 1GL) nos quais variam, entre estes, suas frequências naturais, mantendo o mesmo amortecimento. No caso de análises sísmicas, este gráfico é construído, de forma geral, em termos de aceleração, velocidade ou deslocamento *versus* período da estrutura (no caso, o oscilador de 1GL).

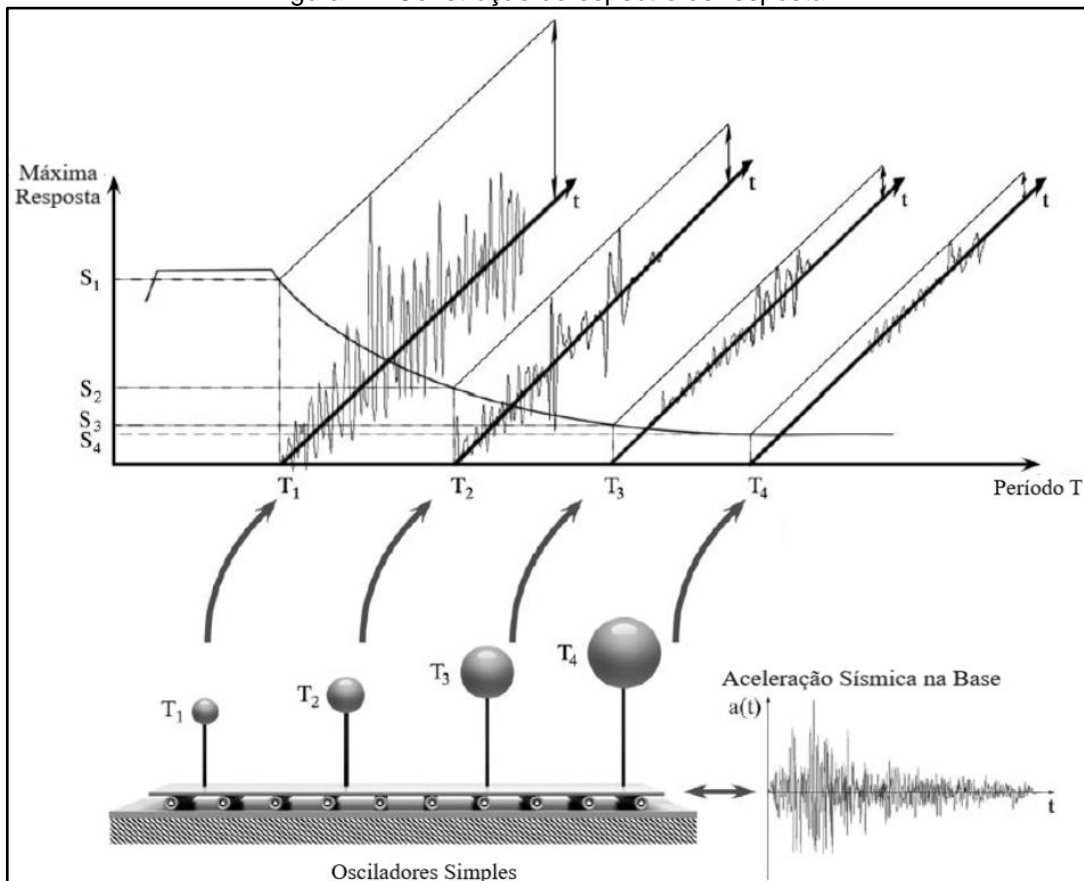
Segundo Brasil e Silva (2015), normalmente o espectro de resposta sísmico é construído em cinco etapas (Figura 14):

- 1) Definição da taxa de amortecimento;

- 2) Variação da frequência (ou período) natural;
- 3) Aquisição de respostas (podendo ser parâmetro de aceleração, velocidade ou deslocamento) para toda a história no tempo da ação sísmica. Sendo estas respostas para cada frequência (ou período) natural estabelecida;
- 4) Determinação dos maiores valores de resposta para cada frequência (ou período) natural;
- 5) Elaboração de gráfico com os diversos pontos de máximo para cada frequência (ou período) natural;

Pode-se, ainda, variar a taxa de amortecimento e seguir os mesmos passos para determinar o espectro relativo a outras taxas.

Figura 14: Construção de espectro de resposta



Fonte: Adaptado de Vrochidou et al. (2014)

## 4.2 Fundamentos gerais para geração de espectros de resposta através da PSHA

Uma forma alternativa para desenvolver um espectro de resposta devido a um sismo é através do método da PSHA. O resultado desta análise é a curva de aceleração espectral ( $AE$ ) versus a probabilidade (ou taxa) de excedência ( $PE$ ) em  $n$  anos e este último está diretamente relacionado ao período de retorno ( $T$ ) através da equação:

$$PE = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t \quad \text{Equação 17}$$

Em que:

- $t$  é o número de anos associado à probabilidade de excedência, isto é, o tempo de exposição considerado para o qual a  $PE$  terá determinado valor, dado um período de retorno. Assim, para os casos relacionados ao escopo desse trabalho, o tempo para o qual uma estrutura manterá suas condições de resistência e desempenho em serviço especificados durante a fase de projeto.

Assim, diz-se que um determinado evento aleatório tem uma probabilidade  $PE$  de ocorrer em  $t$  anos e isso está relacionado a um período de retorno  $T$ .

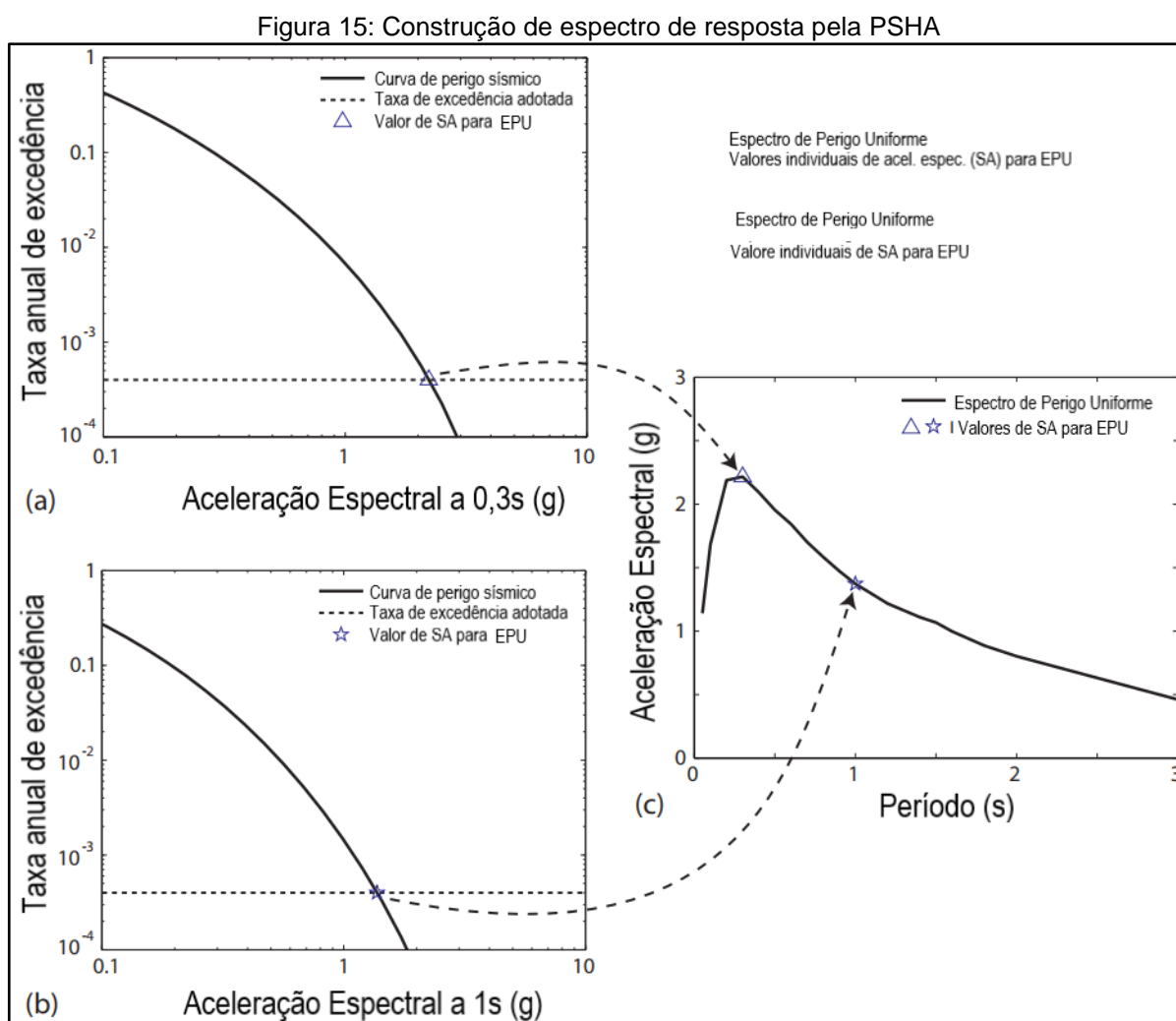
Alternativamente, segundo McGuire (2004), a  $PE$  pode-se relacionar com a frequência de excedência ( $\gamma$ ) através da seguinte expressão:

$$PE = 1 - e^{-\gamma t} \quad \text{Equação 18}$$

Dessa forma, é sabido que o espectro de resposta de projeto nas normas técnicas (nacionais ou internacionais) é sempre relativo a uma mesma  $PE$ , pois depende do valor  $a_g$  das zonas sísmicas e esta aceleração, por sua vez, depende da probabilidade que é padronizada por cada norma técnica. Assim, no caso do Brasil, por exemplo, o espectro de resposta de projeto tem  $PE$  de 10 % em 50 anos, conforme já foi mencionado no item 1.1. Devido a este fato, estes gráficos são chamados de

Espectros de Perigo Uniforme<sup>7</sup> (EPU), pois estes trazem o conjunto de acelerações espectrais relativas à mesma probabilidade (ou ao mesmo perigo), para as diversas frequências da GMPE ( $f_{GMPE}$ ) ou períodos ( $T_{GMPE}$ ).

Para determinação do EPU é necessário calcular o perigo sísmico relativo a cada  $f_{GMPE}$  ou  $T_{GMPE}$ . Isto é possível, pois muitas GMPE são definidas não apenas para o PGA, mas para diversas frequências (ou períodos) naturais. Dessa forma, pode-se, então, calcular uma curva aceleração espectral *versus* probabilidade de excedência ( $AE \times PE$ ) para cada uma dessas frequências da equação de predição e assim, ao fixar uma determinada  $PE$  da curva, obter os valores de aceleração associados a eles (Figura 15).



Fonte: Adaptado de Baker (2013)

<sup>7</sup> Tradução do inglês para *Uniform Hazard Spectrum (UHS)*

A seguir são mostrados dois procedimentos distintos para geração de EPU usando os conceitos da PSHA já abordados neste trabalho. O primeiro deles apresenta um procedimento manual para o cálculo das probabilidades de excedência a partir da determinação das frequências de excedência, usando apenas planilhas para organização e cálculo. No segundo procedimento é utilizado, para a construção do espectro, o *software* R-CRISIS 18.4.2, que tem sido usado em diversas aplicações da PSHA.

### 4.3 Procedimento manual de geração de espectro de resposta

O procedimento descrito neste item segue a metodologia apresentada no trabalho de Silva (2009) com algumas poucas adaptações devidamente justificadas.

#### 4.3.1 Definição da fonte sísmica e de sua discretização

Essa etapa corresponde ao passo (1) descrito na Tabela 2.

A fonte sísmica foi escolhida de tal forma que envolvesse a maior parte dos sismos do RN (na Figura 16 é a forma geométrica delimitada pelas linhas vermelhas) registrados no catálogo. Conforme já discutido no item 3.2, esta caracterização como uma área sendo uma fonte geradora de sismos é apenas uma simplificação que tende a ser bastante adequada para regiões de baixa sismicidade como o estado da presente análise. Desta feita, o espaço delimitado tem uma área de 26.968,04 km<sup>2</sup>.

Figura 16: Área-Fonte sísmica



Fonte: Adaptado de Google Earth



#### 4.3.2 Discretização em sub-regiões

Posteriormente, procedeu-se à discretização desta área em várias sub-regiões quadradas menores (na Figura 17 são as formas geométricas delimitadas pelas linhas laranja) com cerca de 220 km<sup>2</sup>, de tal forma que esse valor fosse aproximadamente igual ao apresentado por Silva (2009). Ao final, a divisão resultou em 123 unidades menores.

É importante salientar que nas extremidades da fonte sísmica ocorrem sub-regiões que não são quadradas. Devido a isso, perto dos limites da área-fonte, considera-se como sub-regiões apenas aquelas que tem área maior ou igual à metade da área das sub-regiões quadradas (estas têm a mesma área pois o espaçamento entre as linhas foi constante) de locais mais afastados das linhas limites da fonte sísmica.

Observa-se que é pressuposto que cada sub-região apresente a mesma sismicidade que as demais, isto é, em todas elas, a ocorrência de sismos com certos valores de magnitude é razoavelmente possível e, também, que o centro de cada uma destas são os prováveis epicentros dos terremotos da região.

Figura 17: Área-fonte discretizada em sub-regiões.



Fonte: Modificada de Google Earth

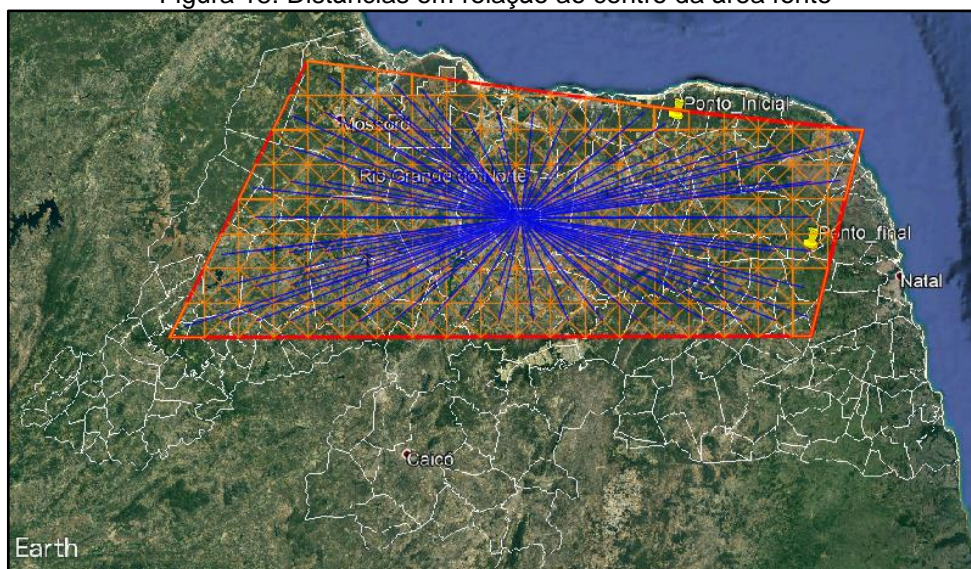
#### 4.3.3 Distâncias

Como cada sub-região é um possível “local gerador” de sismo deve-se escolher um local (pontual) para análise da influência da fonte sísmica nesse ponto. Escolheu-



se aqui adotar o centro da fonte como o local de análise. Dessa forma, tomou-se cada uma das 123 distâncias do centro geométrico (CG) da sub-região até o CG da área-fonte. As linhas azuis na Figura 18 mostram cada uma delas.

Figura 18: Distâncias em relação ao centro da área fonte



Fonte: Adaptado de Google Earth

#### 4.3.4 Caracterização de sismicidade da fonte

Essa etapa corresponde ao passo (2) descrito na Tabela 2.

Nesta etapa busca-se calcular a quantidade de eventos que ocorrem entre intervalos de magnitudes definidos. Isto é feito a partir da determinação de uma lei de recorrência sísmica (Equação 1) que reflita as características da região. A resposta dessa lei é a quantidade de eventos por ano que tem valor de magnitude maior ou igual a um  $m$  escolhido (ver item 3.2).

Com isso, foram escolhidos oito valores de magnitudes para análise da sismicidade entre 4,75 e 7,00 variando com o passo de 0,25 (Tabela 4).

Explicando a Tabela 4:

- A primeira coluna são os valores de magnitude utilizados na análise;
- na segunda coluna calcula-se apenas o valor de  $\log(\Sigma N)$  com os valores das constantes  $a$  e  $b$  da lei de recorrência. Para este caso, esse valor é calculado pela lei de recorrência de Dourado (2014) – Equação 4 – apud Silva (2009);

- na terceira coluna tem-se a quantidade de eventos sísmicos por ano ( $\Sigma N$ ) que tem valores de magnitude maiores ou iguais ao valor definido na primeira coluna;
- na quarta coluna é calculada a quantidade de eventos, com magnitude especificada, que ocorre em um milhão de anos (multiplicando 1.000.000 pela coluna anterior). Esta multiplicação é feita apenas para não se trabalhar com valores muito pequenos e, por isso, posteriormente será retornado para 1 ano apenas;
- na sexta coluna é calculada a quantidade de eventos que ocorrem entre os intervalos de magnitudes em 1.000.000 de anos. Isso é feito através da subtração dos resultados do limite de magnitude superior com os resultados do limite de magnitude inferior;
- na última coluna tem-se a quantidade de eventos por 1.000.000 de anos por sub-região da área fonte discretizada. Essa operação de dividir diretamente pelo número de sub-regiões só é permitida porque se adotou como princípio que a área da fonte sísmica tem sismicidade homogênea, isto leva à conclusão que em cada uma dessas sub-regiões haverá o mesmo “potencial sísmico”, isto é, em todas elas haverá a mesma probabilidade de ocorrer a quantidade de eventos calculados pela lei de recorrência.

Tabela 4: Avaliação de sismicidade da fonte sísmica.

M	$\log(\Sigma N) = 3,11 + (-0,96) * m$	Eventos/ano ( $\Sigma N$ )	Eventos/1.000.000 anos	Intervalos de magnitude	Nº de eventos/1.000.000 em cada intervalo de magnitude	Nº de eventos por sub-região (123) por 1.000.000 de anos
4,75	-1,432175	0,036967919	36967,91867			
				4,75 ≤ M ≤ 5,00	15657,10656	127,2935493
5,00	-1,6714	0,021310812	21310,81211			
				5,00 ≤ M ≤ 5,25	9025,816655	73,38062321
5,25	-1,910625	0,012284995	12284,99545			
				5,25 ≤ M ≤ 5,50	5203,092027	42,30156119
5,50	-2,14985	0,007081903	7081,903424			
				5,50 ≤ M ≤ 5,75	2999,414643	24,3854849
5,75	-2,389075	0,004082489	4082,488782			
				5,75 ≤ M ≤ 6,00	1729,065746	14,05744509
6,00	-2,6283	0,002353423	2353,423035			
				6,00 ≤ M ≤ 6,25	996,7506035	8,103663443
6,25	-2,867525	0,001356672	1356,672432			
				6,25 ≤ M ≤ 6,50	574,5945565	4,671500459
6,50	-3,10675	0,000782078	782,0778752			
				6,50 ≤ M ≤ 6,75	331,2352189	2,692969259
6,75	-3,345975	0,000450843	450,8426564			
				6,75 ≤ M ≤ 7,00	190,9464143	1,552409872
7,00	-3,5852	0,000259896	259,8962421			

Fonte: Autor (2019)

#### 4.3.5 Caracterização da distribuição de acelerações espectrais

Essa etapa corresponde ao passo 3) descrito na Tabela 2.

Nesta etapa é necessário escolher ou desenvolver uma GMPE adequada à fonte sísmica em análise. No presente trabalho, optou-se pelo uso da equação de Toro, Abrahamson e Schneider (1997) pelos motivos já mencionados no item 3.3. Os autores elaboraram uma GMPE para cada um de oito valores de frequências diferentes (PGA; 35; 25; 10; 5; 2,5; 1; 0,5 Hz). Esta equação tem o formato geral mostrado abaixo e depende da magnitude e distância do epicentro do sismo ao ponto de análise:

$$\ln SA_{f_{GMPE}} = C_1 + C_2(m - 6) + C_3(m - 6)^2 - C_4 \ln R_m - (C_5 - C_4) \max \left[ \ln \left( \frac{R_m}{100} \right), 0 \right] - C_6 R_m$$

Equação 19

Em que:

- $SA$  é a aceleração espectral associada a uma frequência  $f_{GMPE}$ ;
- $R_m = \sqrt{r^2 + C_7^2}$ ;
- $r$  é a distância da fonte sísmica ao ponto alvo da análise;
- $m$  é a magnitude de momento sísmico;
- $C_1$  a  $C_7$  são coeficientes que dependem da frequência escolhida (Tabela 5).

Escolhida a GMPE, procedeu-se ao cálculo das acelerações espectrais (para cada uma das frequências da primeira coluna da Tabela 5) que são provocadas por cada uma das sub-regiões no ponto em análise (centro da fonte) devido aos valores de magnitude que variam entre os dois limites com passo de 0,25. A Tabela 6 mostra, a título de ilustração, o formato geral que foi usado para cálculo de acelerações.

Tabela 5: Coeficiente da GMPE de Toro, Abrahamson e Schneider (1997).

$f_{GMPE}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
<b>0,5</b>	-0,97	2,52	-0,47	0,93	0,6	0,0012	7
<b>1</b>	-0,12	2,05	-0,34	0,90	0,59	0,0019	6,8
<b>2,5</b>	0,9	1,7	-0,26	0,94	0,65	0,003	7,2
<b>5</b>	1,6	1,24	0	0,98	0,74	0,0039	7,5
<b>10</b>	2,36	1,23	0	1,12	1,05	0,0043	8,5
<b>25</b>	3,54	1,19	0	1,46	1,84	0,001	10,5
<b>35</b>	3,87	1,19	0	1,58	1,9	0,0005	11,1
<b>PGA</b>	2,07	1,2	0	1,28	1,23	0,0018	9,3

Fonte: Adaptado de Toro, Abrahamson e Schneider (1997)

Tabela 6: Modelo de tabela usado para cálculo de aceleração espectral das sub-regiões variando a magnitude (frequência de 0,5Hz).

Matriz de aceleração (g) em função de r e M						
Sub-região	r	5	5,25	...	6,75	7
<b>1</b>	<b>102,18</b>	0,00022940	0,00052496	...	0,02310801	0,03542738
<b>2</b>	<b>90,12</b>	0,00025934	0,00059815	...	0,02634709	0,04040996
<b>3</b>	<b>79,11</b>	0,00029641	0,00068365	...	0,03013595	0,04624345
...	...	...	...	...	...	...
<b>121</b>	<b>104,05</b>	0,00022642	0,00051505	...	0,02266998	0,03475391
<b>122</b>	<b>117,64</b>	0,00020701	0,00045228	...	0,01989588	0,03049034
<b>123</b>	<b>129,75</b>	0,00019241	0,00040704	...	0,01789889	0,02742300

Fonte: Autor (2019)

A magnitude mínima foi escolhida como 5, conforme o trabalho de Petersen et al. (2018a). E, para regiões cratônicas (que apresentam baixa sismicidade), é razoável adotar magnitudes máximas entre 7,1 e 7,4. (PETERSEN et al., 2018a)

Além disso, é importante ter em consideração os limites de magnitude para os quais cada GMPE é válida. A equação de Toro, Abrahamson e Schneider (1997) é eficaz no intervalo de magnitude de momento entre 5 e 8. Dessa forma, os limites máximos e mínimos definidos estão dentro desse intervalo de validade.

No trabalho de Silva (2009) foram avaliadas as acelerações para o intervalo de magnitude de momento entre 4 e 7. Porém, pode-se observar que o limite inferior de magnitude é menor do que o intervalo em que a GMPE de Toro, Abrahamson e Schneider (1997) é válida.

Colocando em outras palavras o que foi feito até esse ponto: buscou-se analisar a influência da fonte sísmica (discretizada em suas várias sub-regiões) em um ponto arbitrariamente escolhido pelo analista (nesse caso, o centro da área-fonte). É evidente que escolher um ponto muito longe da fonte sísmica acaba sendo, em certo

ponto, irrelevante para a análise, pois, devido à distância, a aceleração espectral teria valor insignificante no ponto em estudo, mesmo nas magnitudes mais elevadas.

Posteriormente, é necessário fazer a análise da distribuição da quantidade de sub-regiões da fonte sísmica, dados os valores de magnitudes definidos (variando com passo de 0,25), que apresentam acelerações dentro de certos intervalos especificados pelo analista. Por exemplo: com base na Tabela 6, contou-se para cada valor de magnitude, a quantidade de sub-regiões que geraram, no ponto analisado (no caso, centro da fonte sísmica), acelerações dentro de certos intervalos definidos. O mesmo procedimento se repetiu para cada um dos valores de frequência da GMPE. A Tabela 7 mostra, como exemplo, os resultados para a frequência 0,5 Hz.

Tabela 7: Matriz de distribuição de acelerações espectrais das sub-regiões entre intervalos para cada magnitude escolhida (frequência de 0,5 Hz).

<b>Distribuição de acelerações de sub-regiões entre intervalos definidos para cada magnitude</b>										
<b>Acelerações espectrais (g)</b>		<b>5</b>	<b>5,25</b>	<b>5,5</b>	<b>5,75</b>	<b>6</b>	<b>6,25</b>	<b>6,5</b>	<b>6,75</b>	<b>7</b>
<b>Lim. Inferior</b>	<b>Lim. Superior</b>									
<b>0,0001</b>	<b>0,0002</b>	12	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>0,0002</b>	<b>0,0005</b>	79	25	0	0	0	0	0	0	0
<b>0,0005</b>	<b>0,001</b>	25	56	15	0	0	0	0	0	0
<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	6	32	59	13	0	0	0	0	0
<b>0,002</b>	<b>0,003</b>	1	7	27	39	1	0	0	0	0
<b>0,003</b>	<b>0,004</b>	0	1	11	21	14	0	0	0	0
<b>0,004</b>	<b>0,005</b>	0	1	4	18	24	0	0	0	0
<b>0,005</b>	<b>0,01</b>	0	1	6	25	52	44	2	0	0
<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	0	0	1	6	25	53	56	15	0
<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	0	0	0	1	5	16	32	37	13
<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	0	0	0	0	1	4	15	22	26
<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	0	0	0	0	0	4	7	17	19
<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	0	0	0	0	1	0	4	8	15
<b>0,06</b>	<b>0,1</b>	0	0	0	0	0	2	5	17	31
<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	0	0	0	0	0	0	2	6	15
<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	2
<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>0,5</b>	<b>1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>1,0000</b>	<b>-</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que a soma das colunas dessa tabela deve sempre resultar no número total de sub-regiões, que para o presente caso são 123.

#### 4.3.6 Cálculo de períodos de retorno

Essa etapa corresponde ao passo 4) descrito na Tabela 2.

Realizando o produto do número de eventos em 1.000.000 de anos por sub-região da Tabela 4 com a quantidade de sub-regiões da Tabela 7, ambos especificados nos respectivos intervalos de magnitude, obtém-se então a quantidade de eventos sísmicos que ocorrem em 1.000.000 de anos em um intervalo de aceleração espectral e em cada valor de magnitude especificado (Tabela 8). Isto é a quantidade de eventos – agora relacionados a valores de aceleração (ou o parâmetro escolhido de movimento do solo) – que são produzidos pela fonte sísmica no ponto escolhido para a análise.

Tabela 8 : Número de eventos dentro de intervalos de aceleração espectral em 1.000.000 de anos (frequência de 0,5 Hz).

<b>Matriz de número de eventos em 1.000.000 que produzem valores de aceleração espectral (em cada magnitude) dentro de intervalos especificado</b>										
<b>Acelerações espectrais (g)</b>		<b>5</b>	<b>5,25</b>	<b>5,5</b>	<b>5,75</b>	<b>6</b>	<b>6,25</b>	<b>6,5</b>	<b>6,75</b>	<b>7</b>
<b>Lim. Inferior</b>	<b>Lim. Superior</b>									
<b>0,0001</b>	<b>0,0002</b>	1527,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,0002</b>	<b>0,0005</b>	10056,19	1834,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,0005</b>	<b>0,001</b>	3182,34	4109,31	634,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	763,76	2348,18	2495,79	317,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,002</b>	<b>0,003</b>	127,29	513,66	1142,14	951,03	14,06	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,003</b>	<b>0,004</b>	0,00	73,38	465,32	512,10	196,80	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,004</b>	<b>0,005</b>	0,00	73,38	169,21	438,94	337,38	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,005</b>	<b>0,01</b>	0,00	73,38	253,81	609,64	730,99	356,56	9,34	0,00	0,00
<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	0,00	0,00	42,30	146,31	351,44	429,49	261,60	40,39	0,00
<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	0,00	0,00	0,00	24,39	70,29	129,66	149,49	99,64	20,18
<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	14,06	32,41	70,07	59,25	40,36
<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,41	32,70	45,78	29,50
<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	14,06	0,00	18,69	21,54	23,29
<b>0,06</b>	<b>0,1</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,21	23,36	45,78	48,12
<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,34	16,16	23,29
<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,69	3,10
<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,55
<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,55
<b>0,5</b>	<b>1</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>1,0000</b>	<b>-</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autor (2019)

Somando-se o número de sismos de cada uma das magnitudes em um mesmo intervalo de aceleração (soma das linhas) tem-se o total de eventos que ocorrem em 1.000.000 de anos entre as magnitudes mínima e máxima, isto é, refere-se à quantidade de vezes em que irá ocorrer, no ponto de análise, acelerações dentro dos intervalos especificados (Tabela 9 – Coluna “Frequência de Ocorrência”).

Após isso, calcula-se a frequência de excedência, acumulando o número de ocorrências de cada intervalo de aceleração com os demais intervalos abaixo (referente à maiores valores de aceleração). Na prática, isso representa quantas vezes as acelerações terão valores acima do limite inferior de cada intervalo em 1.000.000 de anos. É uma "frequência de excedência" em 1.000.000 anos (Tabela 9 – Coluna “Frequência de Excedência ou Ocorrência”).

Os valores do período de retorno para cada valor de aceleração são tomados como o inverso da frequência de excedência. Também multiplica-se esse valor por 1.000.000, pois o que importa é a frequência com que os valores são excedidos em um ano, obtendo assim, o período real de tempo em que cada valor de aceleração vai voltar a ocorrer (Tabela 9 – Coluna “Período de Retorno”).

Além disso, pela Equação 18, pode-se obter, a partir das frequências de excedência, os valores de  $PE$  associado a cada valor de aceleração espectral para uma dada  $f_{GMPE}$  (Tabela 9 – Coluna “Probabilidade de excedência”). Pelo mesmo motivo mencionado anteriormente, é necessário dividir a frequência de excedência por 1.000.000 de anos.

Tabela 9: Resultados de frequências e períodos de retorno (frequência de 0,5 Hz).

Acelerações espectrais (g)		Frequência de Ocorrência	Frequência de Excedência ou Acumulada	Período de Retorno	Probabilidade de Excedência
Lim. Inferior	Lim. Superior				
0,0001	0,0002	1527,52	36708,02	27,24	0,8405
0,0002	0,0005	11890,71	35180,50	28,42	0,8278
0,0005	0,001	7926,18	23289,79	42,94	0,6879
0,001	0,002	5924,74	15363,62	65,09	0,5361
0,002	0,003	2748,19	9438,87	105,94	0,3762
0,003	0,004	1247,60	6690,68	149,46	0,2843
0,004	0,005	1018,90	5443,08	183,72	0,2383
0,005	0,01	2033,72	4424,18	226,03	0,1985
0,01	0,02	1271,54	2390,46	418,33	0,1127
0,02	0,03	493,64	1118,92	893,72	0,0544
0,03	0,04	216,15	625,28	1599,29	0,0308
0,04	0,05	140,39	409,12	2444,24	0,0202
0,05	0,06	77,57	268,73	3721,17	0,0133
0,06	0,1	133,47	191,16	5231,23	0,0095
0,1	0,2	48,79	57,69	17334,15	0,0029
0,2	0,3	5,80	8,90	112326,63	0,0004
0,3	0,4	1,55	3,10	322079,89	0,0002
0,4	0,5	1,55	1,55	644159,78	0,0001
0,5	1	0,00	0,00	0,00	0,0000
1,0000	-	0,00	0,00	0,00	0,0000

Fonte: Autor (2019)

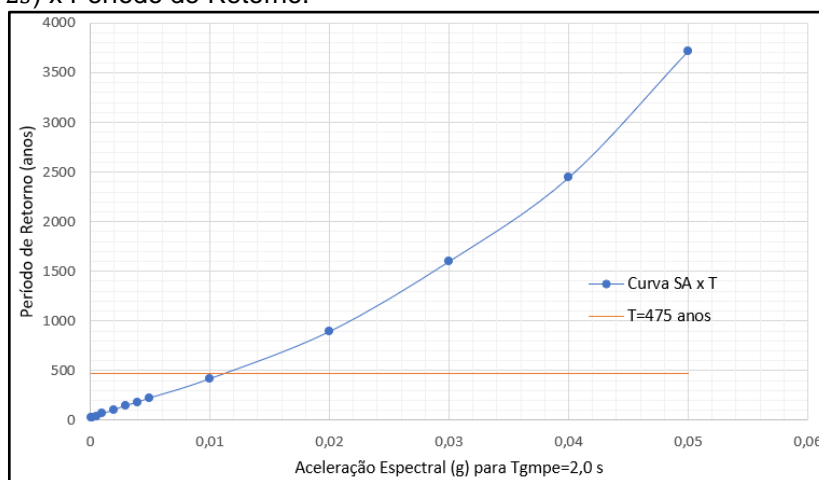
#### 4.3.7 Construção do espectro de acelerações

A partir da Tabela 9 pode-se construir um gráfico de  $SA \times T$  (Figura 19) ou uma curva  $PE \times SA$  para cada frequência da GMPE (Figura 20). A partir da análise de uma dessas curvas, procede-se a extração das acelerações espectrais com um mesmo período de retorno ou com uma mesma probabilidade de excedência. Dessa forma, pode-se plotar os valores dessas  $SA$  variando o  $T_{GMPE}$  (este como sendo inverso da  $f_{GMPE}$  e, por isso, diferente do período de retorno).

Analisando o gráfico da Figura 19, a aceleração espectral com período de retorno de 475 anos (valor padrão da NBR 15421:2006) – que corresponde a uma  $PE$  de 10% em 50 anos – para o caso, é de aproximadamente 0,011g para a frequência de 0,5 Hz (correspondente a um período de 2s) da GMPE. Este valor é, então, plotado (ponto destacado em vermelho na Figura 21) assim como os demais, sendo cada um associado à respectiva frequência,  $f_{GMPE}$ , para um mesmo  $T$ , resultando no espectro de resposta com período de retorno uniforme (Figura 21). Os demais gráficos  $SA \times T$  são mostrados na Figura 55 à Figura 61.



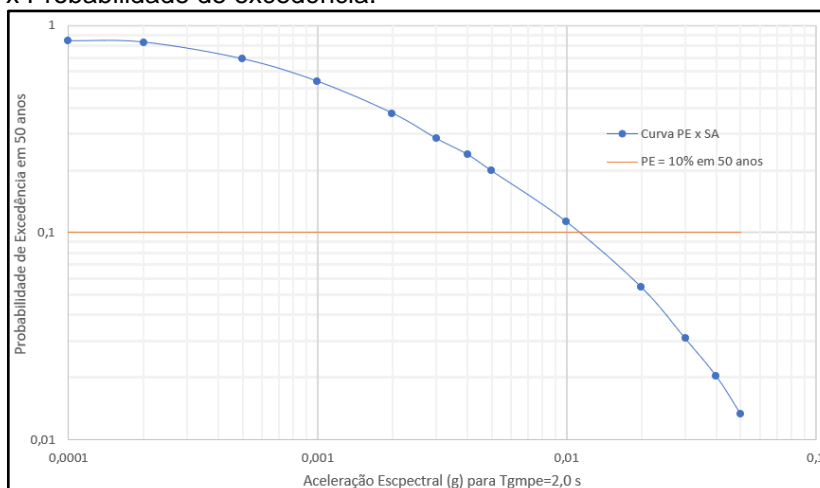
Figura 19: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 0,5 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 2\text{s}$ ) x Período de Retorno.



Fonte: Autor (2009)

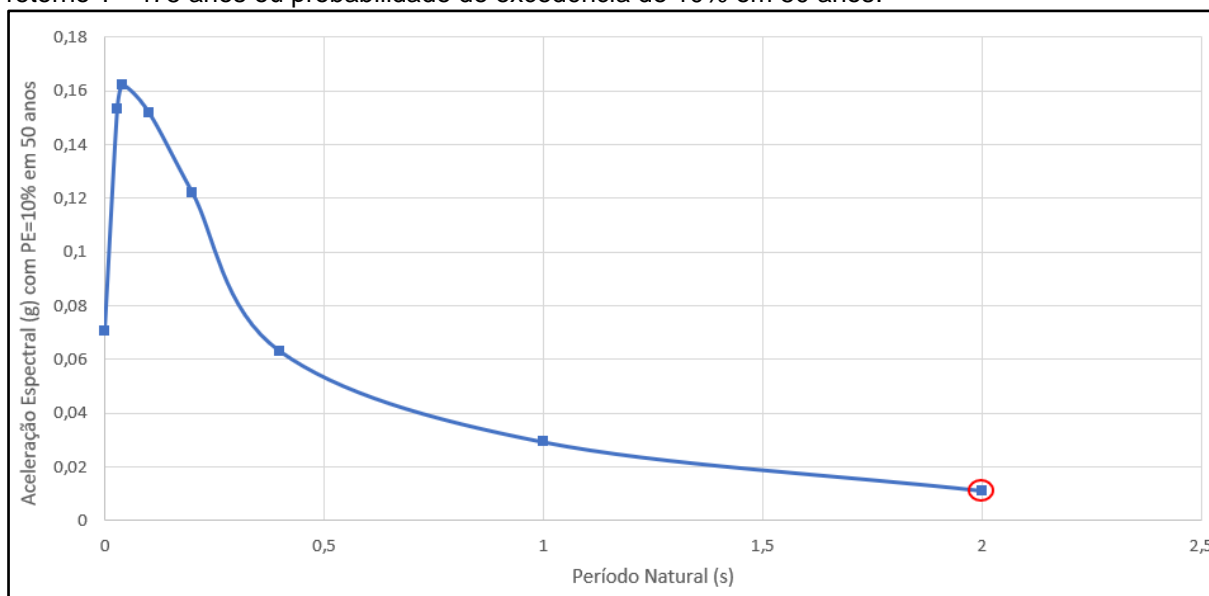
O mesmo espectro seria obtido ao analisar os gráficos de  $PE \times SA$  para cada  $f_{GMPE}$  e extrair os valores de aceleração de cada um deles associados sempre a uma mesma probabilidade de excedência. Para o caso analisado tem-se, por exemplo, na Figura 20, a curva  $PE \times SA$  para uma frequência da GMPE de 0,5 Hz ( $T_{GMPE}$  de 2s). A partir dela é tomado o valor de aceleração espectral com probabilidade de excedência 10% em 50 anos – equivalente ao período de retorno de 475 anos – que é cerca de 0,011g. Esse valor é, então, plotado (ponto destacado em vermelho na Figura 21) em um gráfico associando-o ao valor do período da GMPE do qual ele foi extraído que, no caso, é 2s. Isto é feito para cada  $f_{GMPE}$  em que se procedeu a análise resultando no espectro de resposta de probabilidade uniforme que deve ser igual ao espectro de período de retorno uniforme (Figura 21).

Figura 20: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 0,5 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 2\text{s}$ ) x Probabilidade de excedência.



Fonte: Autor (2019)

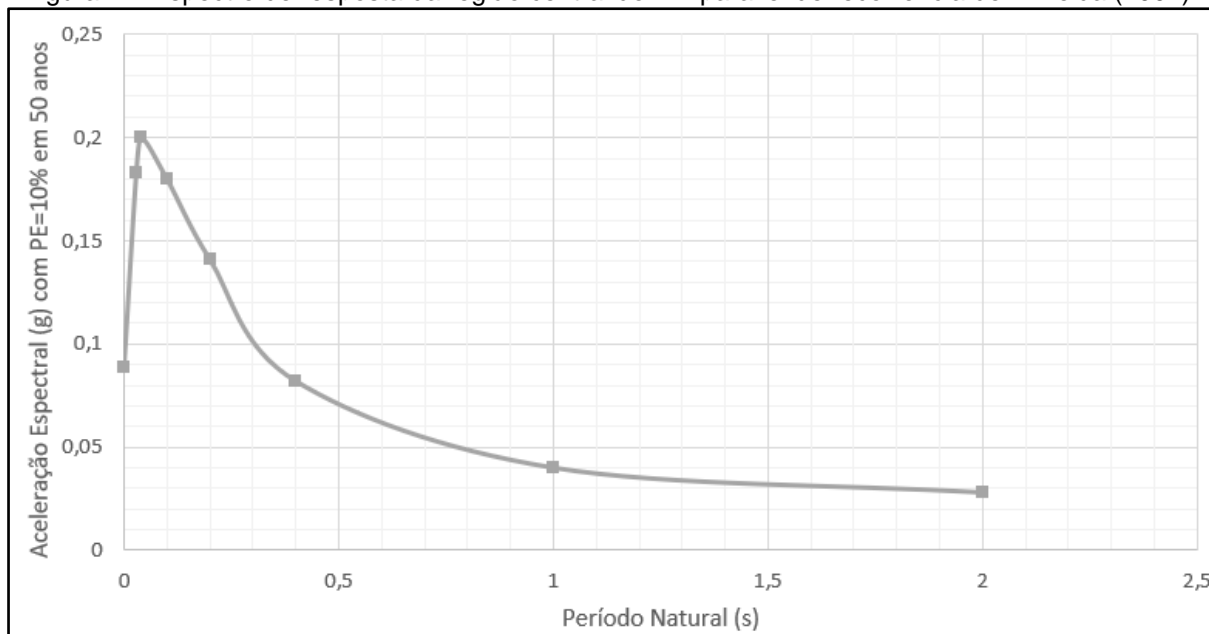
Figura 21: Espectro de Resposta de Aceleração Espectral da região central do RN para período de retorno  $T = 475$  anos ou probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.



Fonte: Autor (2019)

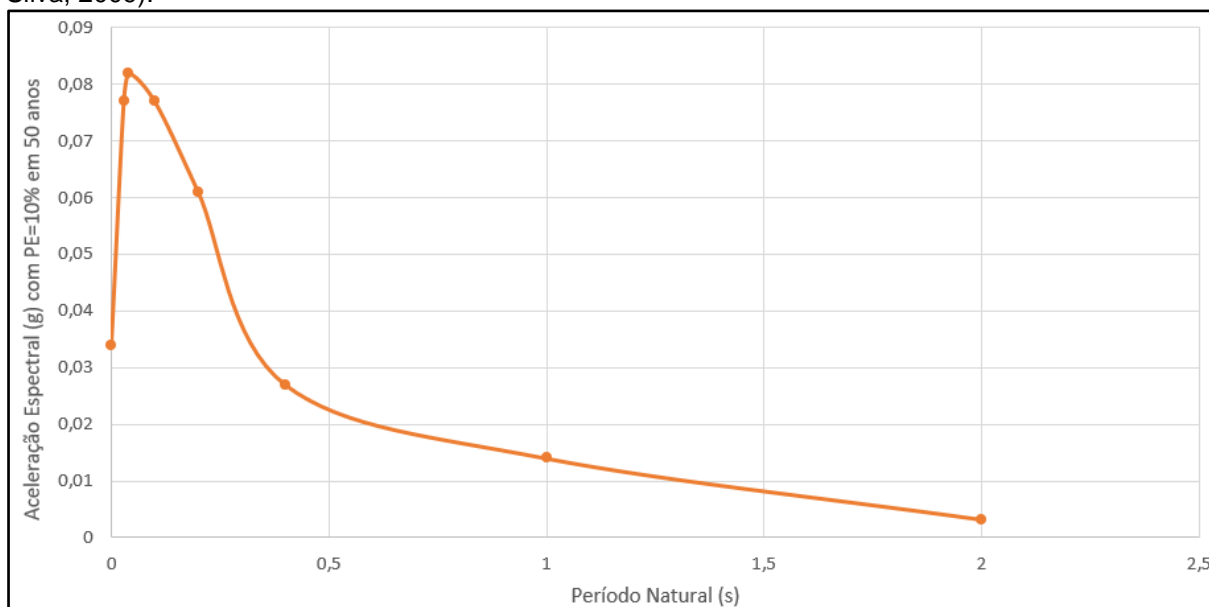
Utilizando-se a mesma metodologia mostrada aqui, além desse espectro também foram elaborados outros para as leis de recorrência da Equação 2 (Figura 22) e da Equação 3 (Figura 23). Os três espectros gerados estão plotados juntos na Figura 24.

Figura 22: Espectro de resposta da região central do RN para lei de recorrência de Almeida (2002).



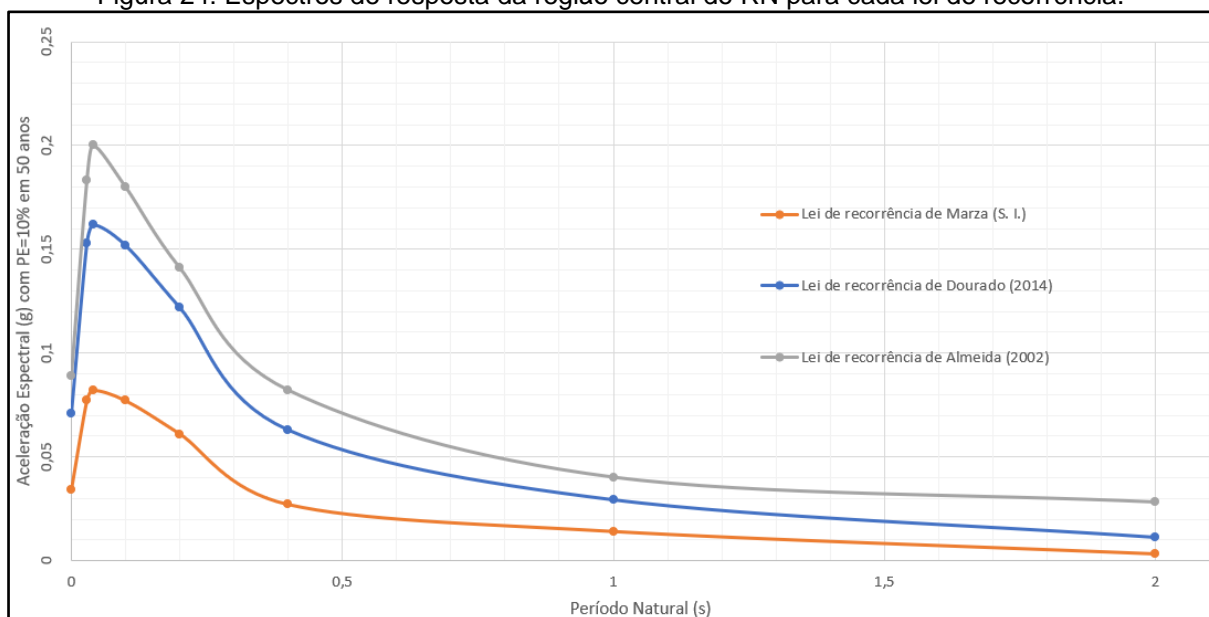
Fonte: Autor (2019)

Figura 23: Espectro de resposta da região central do RN para lei de recorrência de Marza (S. I. apud Silva, 2009).



Fonte: Autor (2019)

Figura 24: Espectros de resposta da região central do RN para cada lei de recorrência.



Fonte: Autor (2019)

#### 4.4 Procedimento utilizando-se o Software R-CRISIS 18.4.2

##### 4.4.1 Software R-CRISIS 18.4.2

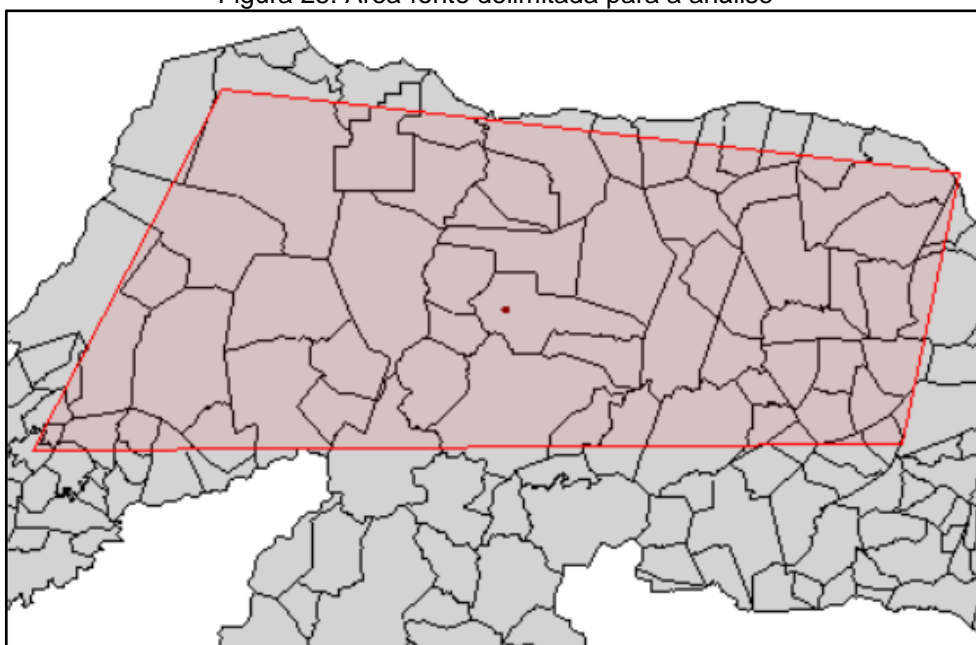
O R-CRISIS 18.4.2 é a última versão disponível do software criado no ano de 1986 por Mario Ordaz e outros e foi inicialmente escrito em linguagem Fortran e posteriormente em Visual Basic. Diversas versões foram desenvolvidas ao longo dos anos nos quais, aos poucos, foram sendo implementadas novas funções tais como

diferentes tipos de fontes sísmicas, diversas GMPEs, formas de distribuição de frequência de magnitude distintas, entre outras implementações. Para informações sobre como se deu o desenvolvimento do R-CRISIS pode-se consultar Meléndez et al. (2017).

#### 4.4.2 Delimitação de fonte sísmica

A fonte sísmica foi delimitada no R-CRISIS (Figura 25) de forma semelhante à realizada no procedimento manual.

Figura 25: Área-fonte delimitada para a análise



Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2

O ponto no centro da área-fonte mostrado na Figura 25 é o centro geométrico desta e será o local de análise de modo análogo ao que foi desenvolvido em 4.3.

A definição da fonte sísmica no R-CRISIS foi feita escolhendo-se como tipo área (*Area Planes*) e colocados os quatro vértices do polígono que delimitavam a região em unidade de graus decimais (quadro vermelho na Figura 26), delimitando-se a profundidade para 5 km<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Esse valor de profundidade foi arbitrário pois observou-se que para esse caso tal valor não influenciava nos valores finais do espectro (ver item 6.3). Isso deve ser estudado para cada situação.

Figura 26: Dados de entrada para áreas-fonte no R-CRISIS 18.4.2

Source 1

Source operations

AreaPlanes

Add new source

Rename Delete Set Alive

Vertex 4  Source is alive

Area Line SSG Grid Area Planes EQ Ruptures RectFault Slab

Elliptic ruptures

Longitude	Latitude	Depth
-35.536375	-6.01636	5
-35.372776	-5.243891	5
-37.475691	-5.004883	5
-38.014908	-6.035349	5

Strike (Deg) 220

Dip (Deg) 90

Aspect ratio 0.6

R=K1\*exp(K2\*M)

K1 0.0101

K2 1.048

Choose

Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2

#### 4.4.3 Caracterização de sismicidade

Esta etapa consiste na definição da lei de recorrência através da entrada dos diversos parâmetros relacionados a ela. Assim, determinam-se as magnitudes mínima ( $M_0$ ) e máxima ( $M_u$ ) entre as quais será feita a análise das acelerações e probabilidade de excedência. Pelos motivos apresentados no item 4.3, os valores foram calculados entres as magnitudes  $M_0 = 5$  e  $M_u = 7$ .

Também, deve-se definir a taxa da magnitude relacionada a  $M_0$ , o  $\lambda_m$ , em unidades de eventos sísmicos por ano. Isto é feito isolando-se o  $\lambda_m$  da Equação 1. Para o caso analisado tem-se que:

$$\lambda_m = 10^{3,11-0,96*5} = 0,02131$$

O valor esperado de  $\beta$  é, em si, a definição do valor de  $b$  da equação, porém sendo feita em termos do logaritmo natural através da expressão (Pirchiner, 2014):

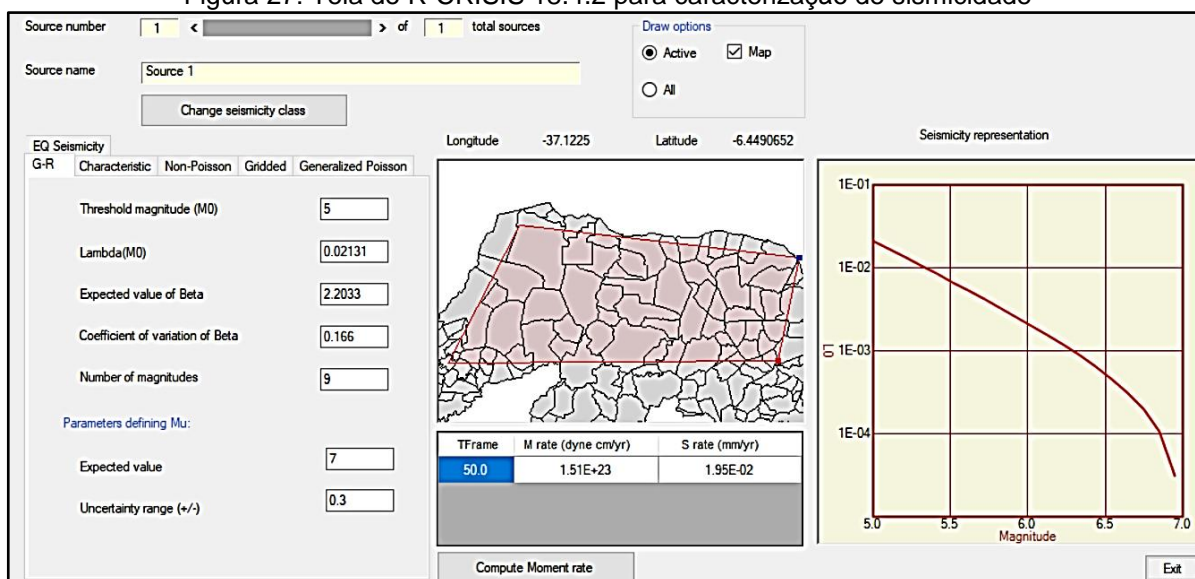
$$\beta = b * \ln(10)$$

Assim, no caso analisado:

$$\beta = 0,96 * \ln(10) = 2,2033$$

O número de magnitude representa a quantidade de pontos de magnitudes que serão discretizados entre os valores de  $M_0$  e  $M_u$ , definidos para o cálculo do perigo sísmico.

Figura 27: Tela de R-CRISIS 18.4.2 para caracterização de sismicidade



Fonte: Adaptado de R-CRISIS (2019)

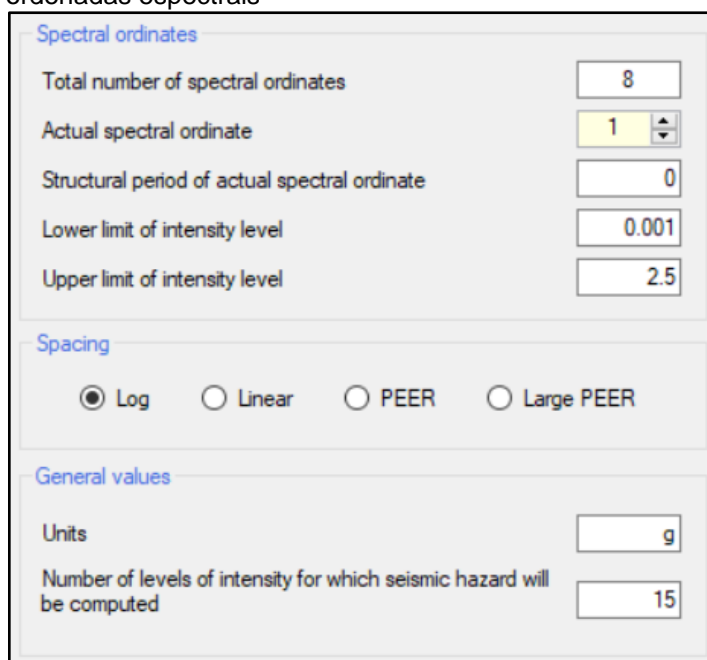
#### 4.4.4 Definição de ordenadas espectrais

Nesta etapa, no R-CRISIS definem-se as chamadas “ordenadas espectrais”, isto é, designa-se aqui para quantos e quais períodos ( $T_{GMPE}$ ) serão computados os valores de aceleração. Esse ponto é importante, principalmente, se o objetivo final for a geração de espectros de resposta.

O cálculo da  $PE$  é realizado para cada um dos valores de acelerações<sup>9</sup> espectrais de cada um dos períodos. Assim, “spacing” (Figura 28) estabelece como se dará o espaçamento entre as várias  $SA$  definidas dentro do intervalo entre os limites superior e inferior estabelecidos nos “limit of intensity level” (Figura 28). No caso, foi escolhido espaçamento  $\log_{10}$ , isto é, a forma como se dará o espaçamento de acelerações serão de acordo com a função  $\log_{10}$ . A quantidade de  $SA$  para cada valor de período é definido pelo campo “Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed” (Figura 28).

É importante observar que os limites superiores e inferiores não afetarão significativamente o cálculo final da PSHA, pois estes são úteis apenas para definir o intervalo de construção da curva  $PE \times SA$ . Porém, faz-se necessário que, dentro desse espaço entre os limites, ocorra o valor de probabilidade de excedência especificado para construção do espectro. Por exemplo, se o Espectro de Perigo Uniforme (EPU) for relativo a  $PE$  de 10% em 50 anos então é necessário que seja possível obter da curva  $PE \times SA$  esse valor e relacioná-lo então a uma aceleração.

Figura 28: Tela de R-CRISIS 18.4.2 para definição de ordenadas espectrais



Spectral ordinates	
Total number of spectral ordinates	8
Actual spectral ordinate	1
Structural period of actual spectral ordinate	0
Lower limit of intensity level	0.001
Upper limit of intensity level	2.5
Spacing	
<input checked="" type="radio"/> Log	<input type="radio"/> Linear
<input type="radio"/> PEER	<input type="radio"/> Large PEER
General values	
Units	g
Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed	15

Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2'

<sup>9</sup> Aqui, não necessariamente seria aceleração, mas qualquer grandeza que represente o movimento sísmico, isto é, deslocamento ou velocidade.

Para o caso analisado neste trabalho, foram tomados oito valores diferentes de períodos para cálculo da PSHA da mesma forma como se procedeu no item 4.3. A Tabela 10 sintetiza as informações para cada período:

Tabela 10: Valores de entradas das ordenadas espectrais no R-CRISIS 18.4.2

$T_{GMPE}$	$f_{GMPE}$	Limite. Inferior de Aceleração	Limite Superior de Aceleração	"Spacing"	Números de pontos
0	PGA	0,001	2,5	Log	15
0,02857	35	0,001	2,5	Log	15
0,04	25	0,001	2,5	Log	15
0,1	10	0,001	2,5	Log	15
0,2	5	0,001	2,5	Log	15
0,4	2,5	0,001	2,5	Log	15
1	1	0,001	1,5	Log	15
2	0,5	0,001	1	Log	15

Fonte: Autor (2019)

#### 4.4.5 Definição da GMPE

Nesta etapa busca-se definir uma ou um conjunto de GMPEs para caracterizar o movimento do solo. No R-CRISIS será mostrada uma tela semelhante à Figura 29 que, para adicionar uma nova equação, o usuário deve ir em "Add model" e imediatamente irá se abrir uma tela semelhante ao que é mostrado na Figura 30 onde pode-se proceder à escolha uma GMPE adequada. Para o presente trabalho a equação usada será a mesma do 4.3.

Para cada uma das GMPE disponíveis no R-CRISIS apresenta-se uma breve descrição da equação (destacado em quadro vermelho na Figura 30). É importante atentar para os intervalos de validade das grandezas envolvidas em cada etapa da análise para que o programa não venha a mostrar algum tipo de erro quando for realizar o processamento. A título de exemplo, a GMPE de Toro et al. (1997) tem validade entre as magnitudes 5 e 8, portanto, no momento de proceder à caracterização de sismicidade deve-se considerar a adequação desses valores quando definidos as magnitudes  $M_0$  e  $M_u$  da análise.



Figura 29: Tela do R-CRISIS 18.4.2 para definição de GMPE

Number of spectral ordinates: 9      Attenuation tables: 1

Buttons: Add hybrid model, Add model, Edit model, Delete model, Exit

Attenuation table: 1

Plot of attenuation relation: Source for model assignment, GMPE description

Parameters:

- Magnitude: 7
- Att. curve: Focal
- Epic. Distance (Km): 20
- Spectrum:
- Depth (Km): 10
- Spect. Ord.: 1

Intensity in g for T=0.000

Special regions and attenuation models: General model

Active special region: 0      Number of special regions: 0

Attenuation model assigned to this region: 0

Vertex: 0

Long	Lat

Buttons: Add region, Import SHP, Del region, Rename region

Vertex in counter-clockwise order

Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2

Figura 30: Tela do R-CRISIS 18.4.2 para escolha da GMPE

Hybrid SPHERA

Gómez (2017)

Jaimes 2005, Mexico City

McVerry et al (2006)

Reyes 1999 Mexico City

Atkinson (2008) ENA

Atkinson and Boore (2006)

Atkinson and Boore (2006), Vs30 explicit

Bindi et al (2017)

Campbell (2003)

Campbell (2003) for SHARE

Pezeshk et al, 2011

Pezeshk et al. (2018)

Tavakoli and Pezeshk (2005)

Toro et al (1997)

Yenier and Atkinson (2015)

Abrahamson et al. (2016) - BCHydro

Aroyo and Singh (2017)

Aroyo et al. (2010) - Site effects in Mexico City

Atkinson and Boore (2003)

Chavez et al. (2006)

Contreras and Boroschek (2012)

García et al. (2005)

Jaimes et al. (2015) CU

Kanno et al. (2006)

Lin and Lee (2008)

Montalva et al. (2017)

Shama et al. (2009)

Youngs et al. (1997)

Zhao et al. (2006)

User Name:

Buttons: OK, Cancel

Magnitude type:

- Moment Magnitude
- LG magnitude

Region:

- Midcontinent
- Gulf

Sigma truncation:

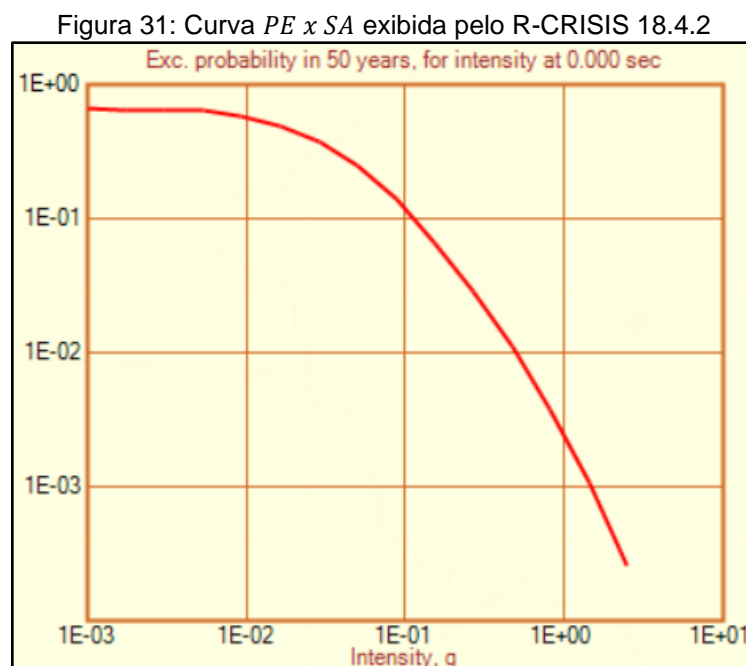
Units coefficient:

**Brief Description**  
Brief description: GMPE developed from earthquakes in Central and Eastern range: 1 to 500; Valid magnitude range: 5 to 8; Type of distance metric: JyB.

Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2

#### 4.4.6 Curvas de $PE \times SA$

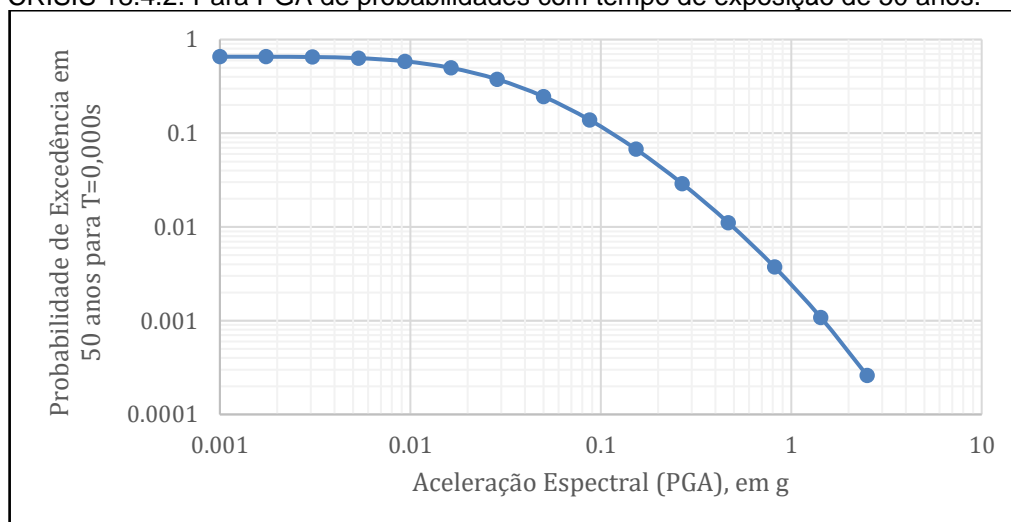
A curva  $PE \times SA$  para o PGA é exibida no R-CRISIS tal como a Figura 31. O *software* calcula, para cada período definido, uma curva semelhante a essa.



Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2

Apesar de não indicar, no R-CRISIS a curva  $PE \times SA$  é mostrada, por padrão, com eixos verticais e horizontais em escala logarítmica. O gráfico mostrado na Figura 32 foi construído com dados de saída disponíveis no *software* e esclarece essa questão.

Figura 32: Curva  $PE \times SA$  construída a partir de dados de saída disponíveis no R-CRISIS 18.4.2. Para PGA de probabilidades com tempo de exposição de 50 anos.



Fonte: Autor (2019)

É importante observar que o tempo de exposição por padrão do R-CRISIS é de 50 anos, mas pode ser alterado nos parâmetros globais na caixa “Time frame” (Figura 33).

Figura 33: Tela do R-CRISIS 18.4.2 para alterar parâmetros globais.

Map return period (years)	PE in 50 years
100	3.93E-01
250	1.81E-01
500	9.52E-02
1000	4.88E-02
2500	1.98E-02

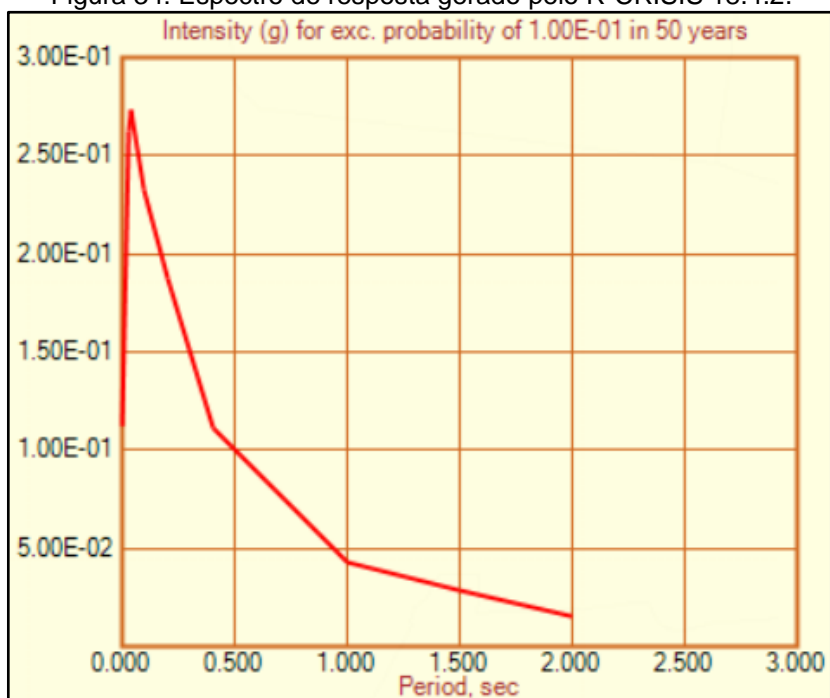
Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2

#### 4.4.7 Espectro de resposta

A partir de cada curva  $PE \times SA$ , para cada período de retorno que o R-CRISIS gera, é tomado o valor da aceleração espectral cuja probabilidade de excedência é de 10% (ou outro valor definido pelo usuário). O espectro gerado, pelo caso ora analisado, é mostrado na Figura 34.

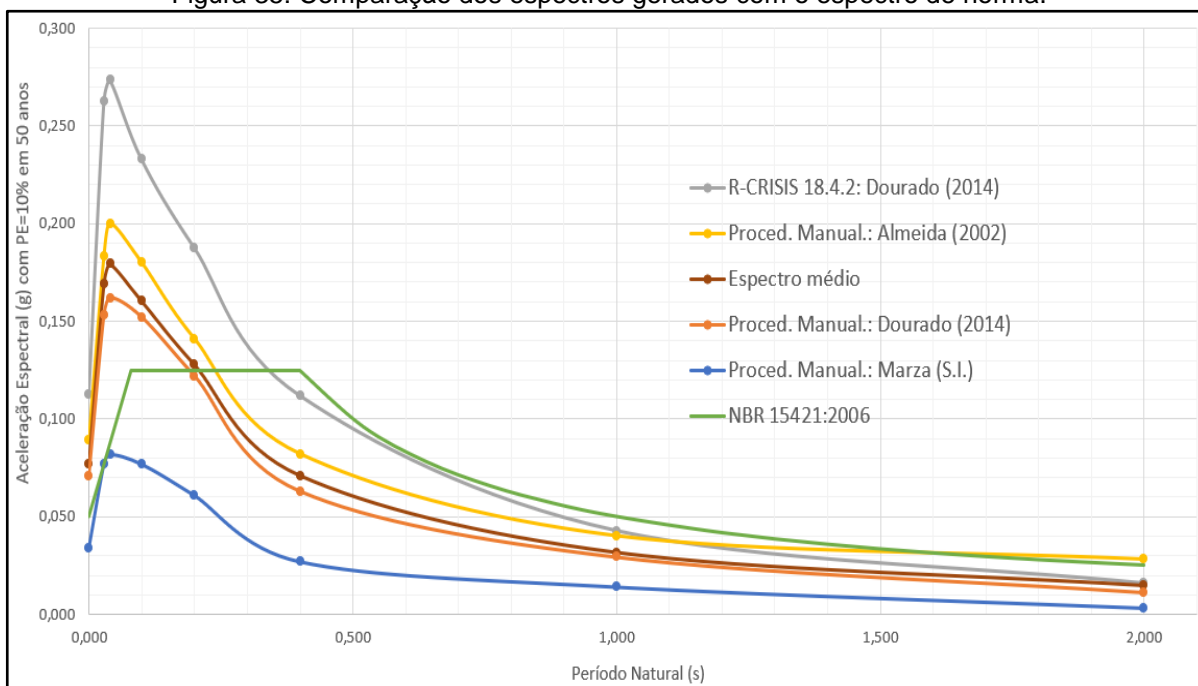
Na Figura 35 pode-se comparar os espectros de resposta de perigo sísmico uniforme obtidos pelos procedimentos manual e automático (item 4.3) com o espectro da NBR 15421:2006. Observa-se que para menores valores de período natural a maioria dos espectros tiveram valores de aceleração superiores ao espectro de norma, exceto aquele gerado pela lei de recorrência de Marza, usada no trabalho de Silva (2009).

Figura 34: Espectro de resposta gerado pelo R-CRISIS 18.4.2.



Fonte: Adaptado de R-CRISIS 18.4.2

Figura 35: Comparação dos espectros gerados com o espectro de norma.



Fonte: Autor (2019)

## 5. GERAÇÃO DE MAPAS DE PERIGO SÍSMICO

Além dos espectros de resposta, outra aplicação da PSHA é a geração de mapas de perigo sísmico. Diante disso, é importante ter a noção da diferença entre os mapas e os espectros (tais como os obtidos no capítulo 4). O primeiro mostra graficamente a aceleração espectral para cada ponto da região analisada, assim o mapa é gerado para um período natural único e preestabelecido. Já o segundo é uma representação gráfica da aceleração para um intervalo de períodos naturais, porém são calculados para um único local geográfico. Isto é, o mapa mostra a variação espacial da aceleração, fixado o período; enquanto o espectro de resposta mostra a variação desta mesma variável em relação ao período natural, fixado o local.

### 5.1 Sobre as propostas de mapas do Brasil

#### 5.1.1 Proposta do GSHAP

##### 5.1.1.1 Considerações gerais

O mapa de perigo sísmico mais conhecido e divulgado no Brasil é o mapa internacional do GSHAP (Projeto Global de Avaliação de Perigo Sísmico), finalizado em 1999, definindo o perigo sísmico de diversas regiões da Terra. Tendo como base esse mapa, a NBR 15421:2006 estabeleceu o mapa de perigo sísmico brasileiro (Figura 1).

O mapa de perigo sísmico do GSHAP (Figura 2) para o Brasil é a proposta mais antiga. Ele foi o produto da união de vários estudos feitos por diversos órgãos de forma independente. Para isso, o globo terrestre foi dividido em diversas regiões nas quais, para cada uma, foi designado um órgão responsável por conduzir o estudo dessa área juntamente com agências nacionais dos países. Dessa forma, para a América do Sul, o CERESIS<sup>10</sup> foi o órgão designado para coordenar a avaliação e construção de mapa para a região. Para isso, foram combinados dois mapas de perigo produzidos por dois projetos distintos: o PAIGH<sup>11</sup> e o PILOT<sup>12</sup>. Na versão final do mapa, a probabilidade

---

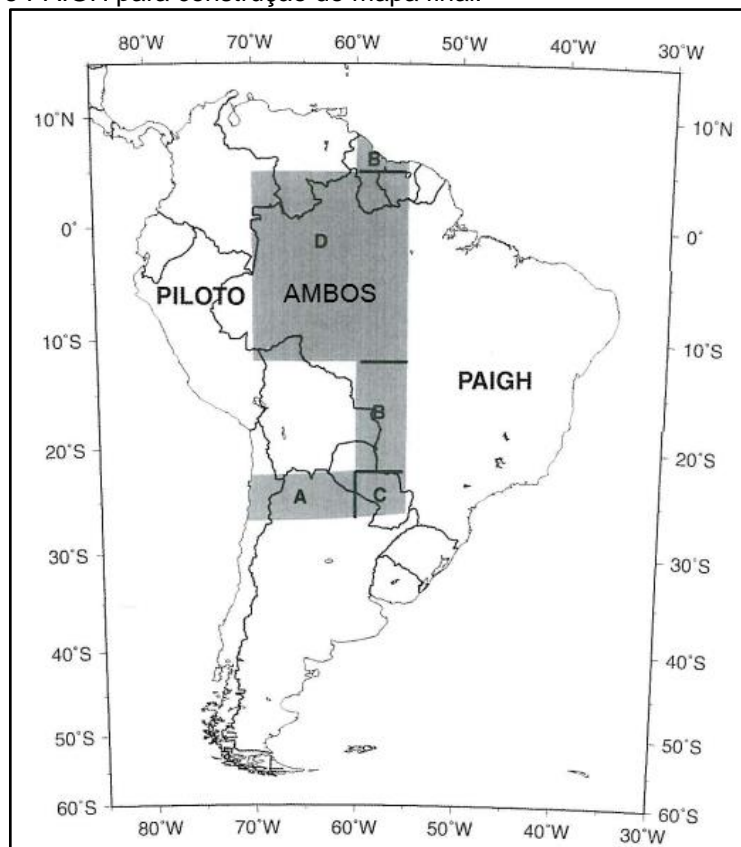
<sup>10</sup> *Centro Regional de Sismologia para América del Sur.*

<sup>11</sup> *Pan-American Institute of Geography and History*

<sup>12</sup> *Pilot Project for Regional Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Assessment*

de excedência do PILOT permaneceu inalterada na região Andina e do PAIGH na região leste e sul da América do sul. Nos demais locais os valores de ambos foram combinados (SHEDLOCK; TANNER, 1999) como pode ser observado na Figura 36.

Figura 36: Combinação dos mapas de perigo sísmico do PILOT e PAIGH para construção do mapa final.

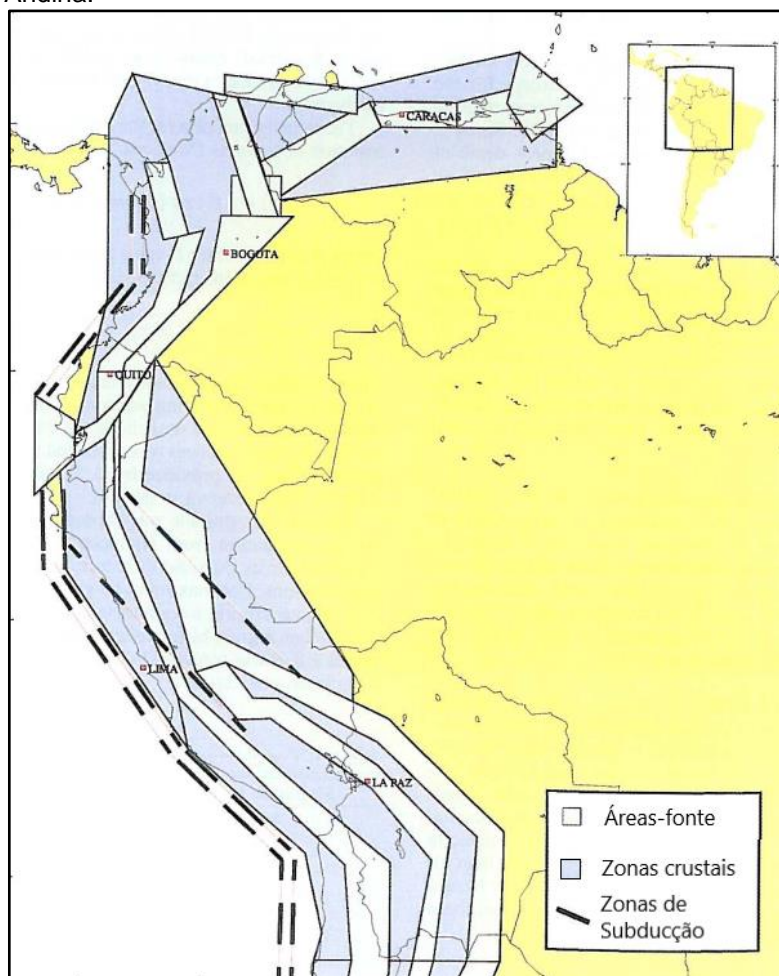


Fonte: Adaptado de Shedlock e Tanner (1999).

No PAIGH, não foram determinadas as fontes sísmicas como áreas, mas o próprio catálogo sísmico serviu como base para a sua determinação utilizando-se do método histórico paramétrico (SHEDLOCK; TANNER, 1999).

No PILOT, as regiões tectônicas e a respectiva fonte associada foram definidas como três tipos distintos: as zonas de subducção entraram na PSHA como fonte do tipo falhas; as zonas com rejeito direcional como áreas-fonte e zonas crustais como fontes sísmicas de “background” (DIMATÉ et al., 1999) – Figura 37.

Figura 37: Fontes sísmicas definidas pelo projeto PILOT na região Andina.

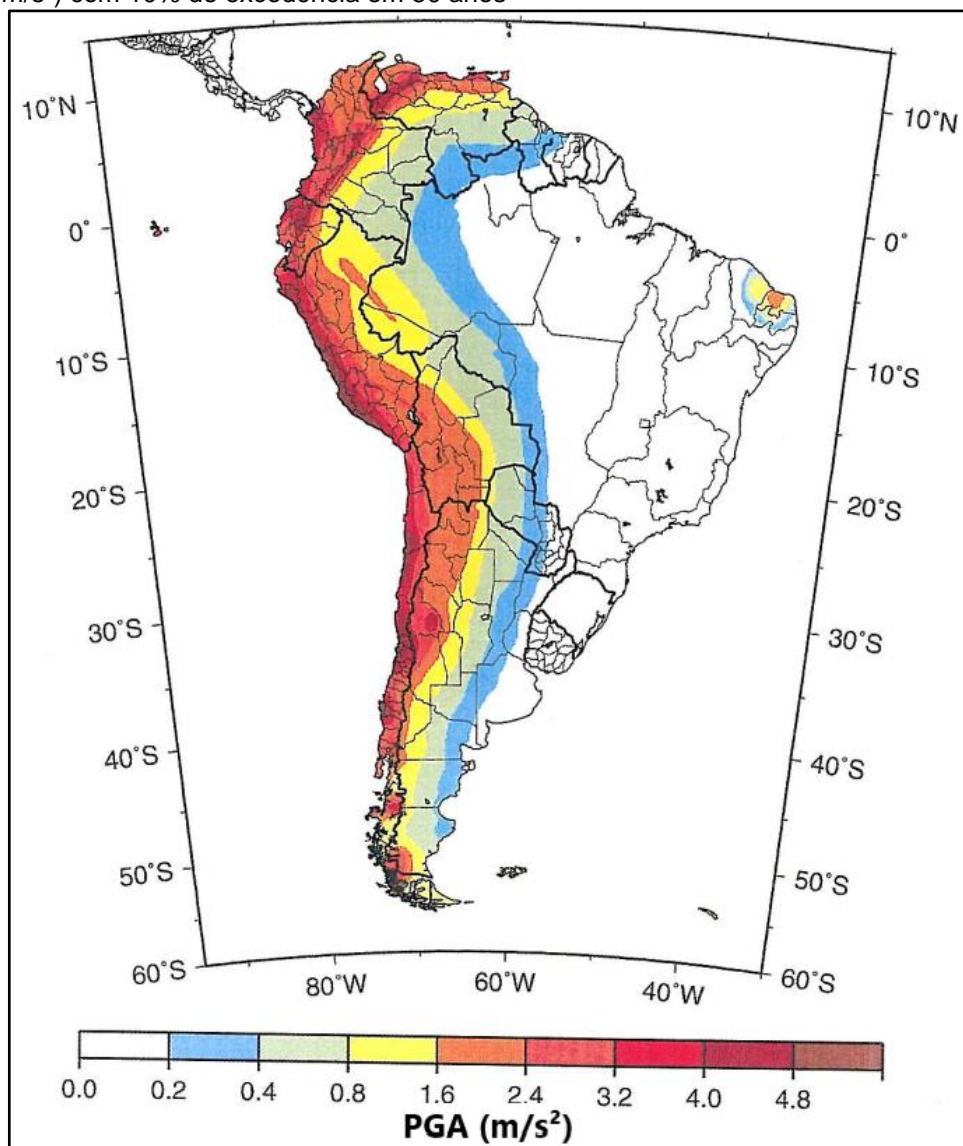


Fonte: Adaptado de Dimaté et al. (1999)

O resultado final do mapa é mostrado na Figura 38 em que se pode observar, mais uma vez, a clara semelhança do mapa com a zonificação sísmica da NBR 15421:2006 (Figura 1). Assim, nota-se que muitas áreas ao longo do território brasileiro tiveram seu potencial sísmico desprezado, como, por exemplo, o estado do MT. Também, observa-se a não consideração da sismicidade costeira ao longo do litoral da região sudeste como mostrado no mapa de Assumpção et al. (2016) na Figura 4.

As GMPEs utilizadas no PAIGH foram discutidas por Shedlock e Tanner (1999) e no PILOT por Dimaté et al. (1999).

Figura 38: Mapa de Perigo Sísmico do GSHAP para a América do Sul. PGA (em  $m/s^2$ ) com 10% de excedência em 50 anos



Fonte: Adaptado de Shedlock e Tanner (1999).

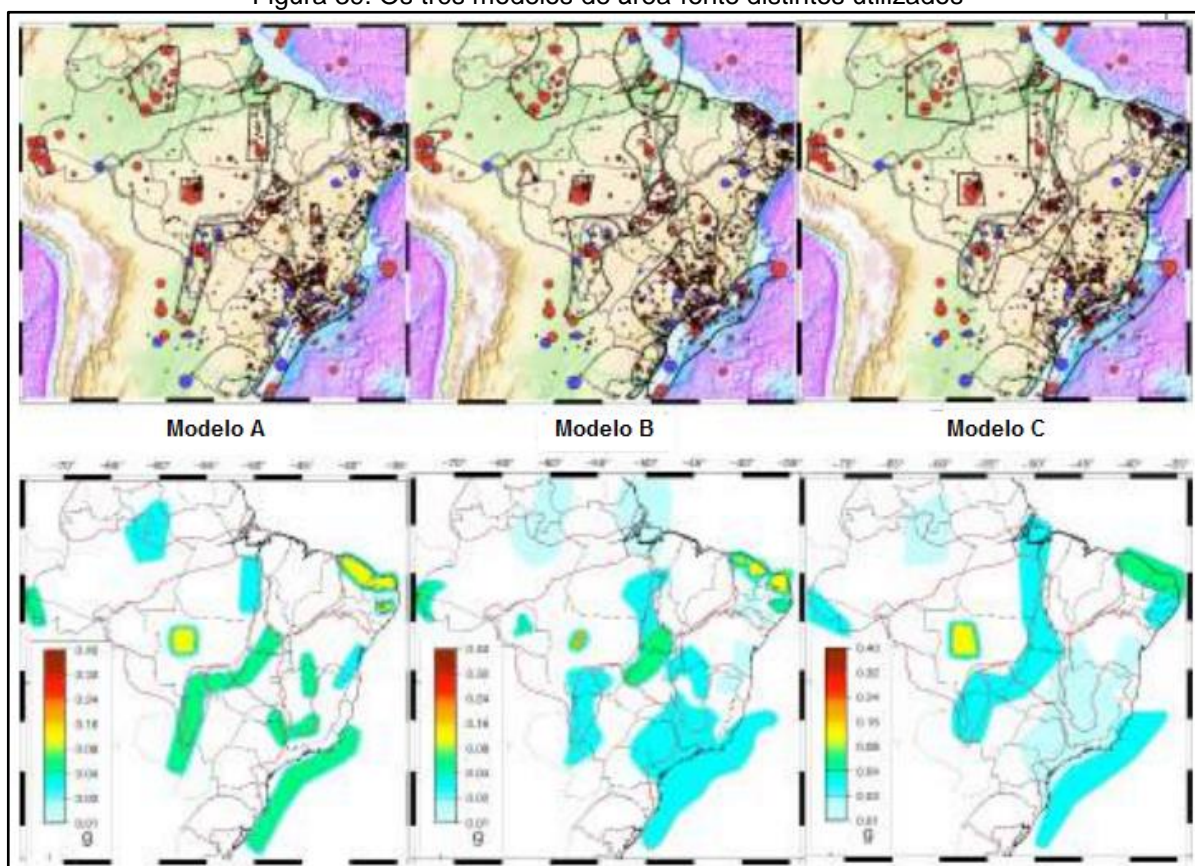
## 5.1.2 Proposta de Assumpção et al. (2016)

### 5.1.2.1 Considerações gerais

A proposta de mapa de perigo apresentada é uma integração de diferentes mapas construídos independentemente por cada um dos quatro analistas que participaram de sua elaboração. Segundo Assumpção et al. (2016), três destes modelos calcularam o perigo sísmico através do método de zonas de áreas-fonte (Figura 39). Também foram integrados a essa proposta os modelos de Pirchiner (2014) que foram construídos através de métodos de suavização.



Figura 39: Os três modelos de área-fonte distintos utilizados



Fonte: Adaptado de Assumpção et al. (2016)

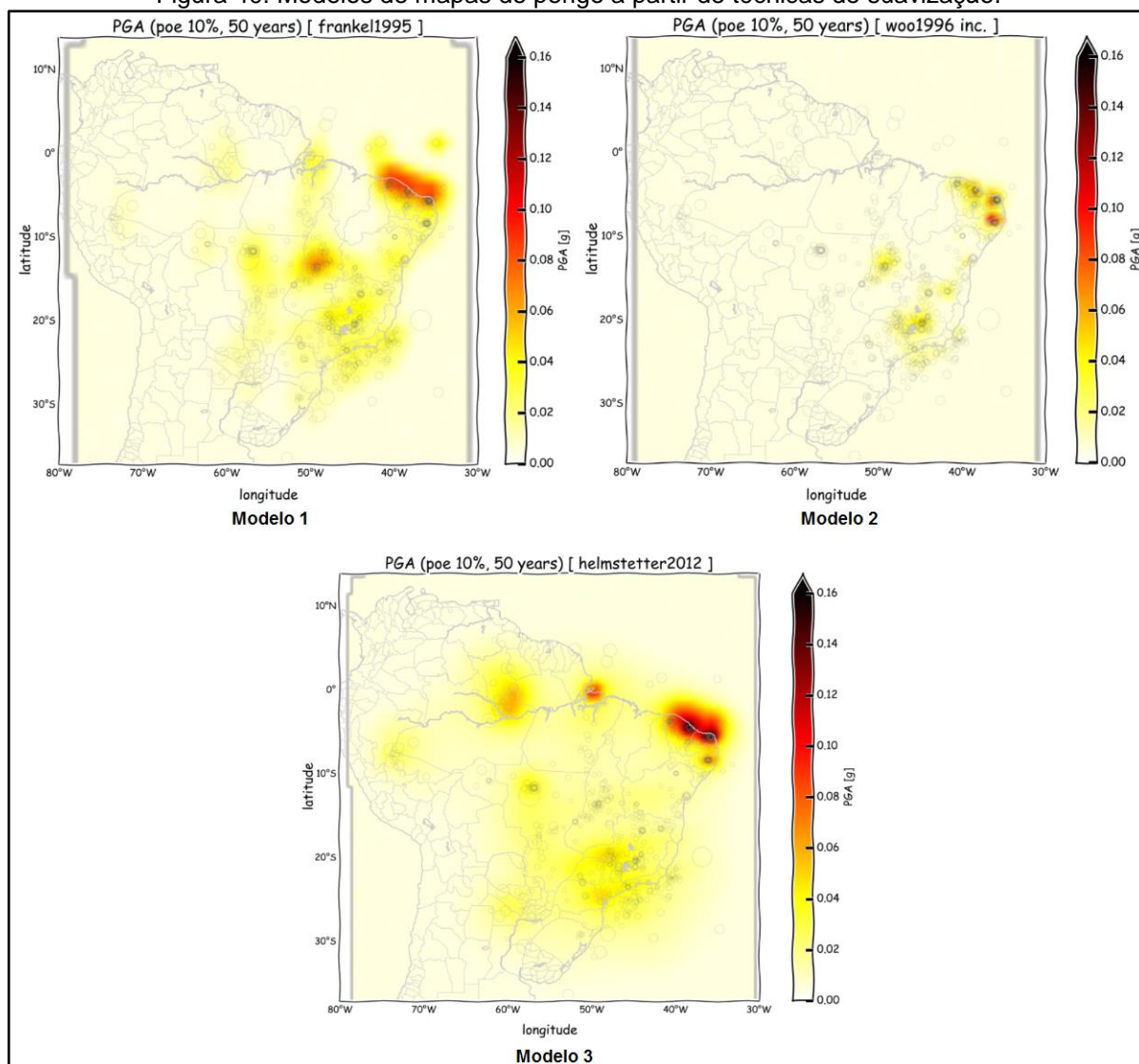
No modelo A foram definidas 11 áreas-fontes distintas para todo o território brasileiro no qual os estados do Ceará e Rio Grande do Norte apresentaram-se como os locais com maiores perigos sísmicos (ambos formam uma mesma fonte sísmica) e, também, o Mato Grosso. O modelo B foi processado com 15 fontes e, novamente, o CE e RN apresentaram-se como os locais de maior sismicidade do Brasil. Também, parte da área do MT e GO tiveram certa relevância. Por último, no modelo C foram definidas 8 áreas sísmicamente ativas no território brasileiro no qual parte do MT mostrou-se o local com maiores valores de aceleração, seguido dos estados do RN e CE.

Pirchiner (2014) construiu mapas de perigo sísmico (Figura 40) aplicando três diferentes Métodos de Suavização (um para cada modelo): o do pesquisador Frankel apresentado em 1995; o de Woo, datado de 1996; e de Helmstetter, de 2012<sup>13</sup>. Este método é assim denominado, pois as taxas de sismicidade decrescem aos poucos na medida em que há o afastamento das áreas que apresentam alguma atividade

<sup>13</sup> Estas referências constam no trabalho de Pirchiner (2014).

sísmica; assim, não há uma queda abrupta dos valores de aceleração. Nesta metodologia, a partir de uma malha de pontos definida para todo o local analisado, estabelece-se, por meio de cada epicentro dos catálogos sísmicos (após ser realizado um tratamento para excluir os eventos dependentes e para determinar o período de completude de cada faixa de magnitude), o número médio de sismos em cada ponto levando em conta a magnitude dos eventos de cada epicentro. (ASSUMPÇÃO et al., 2016).

Figura 40: Modelos de mapas de perigo a partir de técnicas de suavização.



Fonte: Adaptado de Pirchiner (2014)

Os mapas foram, então, integrados aplicando-se diferentes pesos a cada um deles, porém, Assumpção et al. (2016) destaca que, no modelo final (Figura 4), não houve a consideração da influência da atividade sísmica Andina. Este fator pode

provocar importantes alterações no mapa no sentido de aumentar a aceleração em alguns estados, principalmente, mais a oeste do país.

#### 5.1.2.2 GMPE utilizada

Segundo Assumpção et al. (2016) os analistas de cada um dos modelos dos mapas usaram a mesma GMPE de Silva et al. (2002). Essa equação de caracterização do movimento sísmico foi avaliada para magnitudes de momento entre 4,5 e 8,5 e para frequências entre 0,1 e 100 Hz (além do PGA). Também as distâncias em que esta equação é válida compreende os limites entre 1 e 400 km.

Essa GMPE apresenta a seguinte forma funcional:

$$\ln Y = C_1 + C_2M + (C_6 + C_7M) * \ln(R + e^{C_4}) + C_{10}(M - 6)^2 \quad \text{Equação 20}$$

Em que:

- Os coeficientes ( $C_n$ ) variam dependendo da frequência ou período adotado, tal como a equação de Toro et al. (1997);
- $R$  é a distância do ponto de análise até a projeção no plano horizontal da superfície de ruptura;
- $M$  é a magnitude de momento sísmico.

#### 5.1.3 Proposta de Petersen et al. (2018a)

##### 5.1.3.1 Considerações gerais

Petersen et al. (2018a) elaborou mapas de perigo sísmico para toda a América do Sul. Ao caracterizar as fontes sísmicas ele dividiu a área de estudo em dois tipos distintos de regiões tectônicas: ativas (localizadas a oeste do continente, próximo ao encontro de placas) e estáveis (regiões de sismicidade mais baixa no interior das placas).

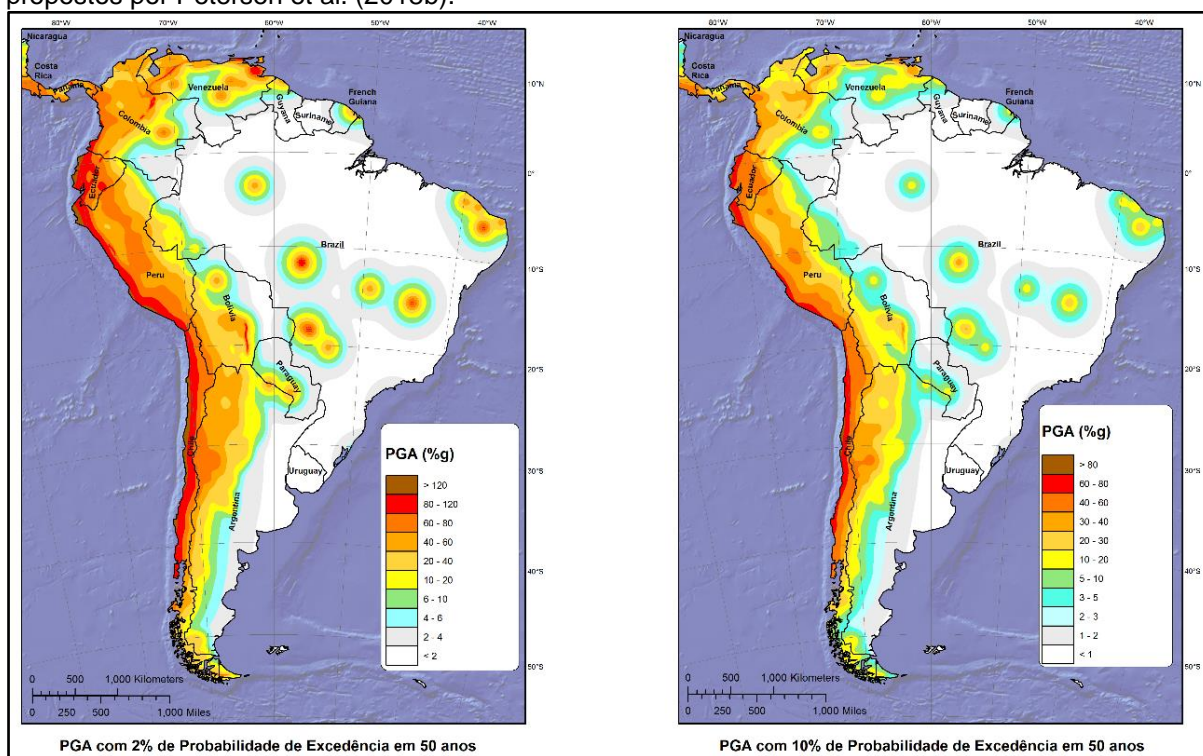
As fontes sísmicas foram definidas de três formas distintas: como falhas na crosta (quando a profundidade era menor que 50 km e apenas para locais ativos); como interface de subducção (locais de encontro de placas); e como pontos (para

regiões ativas ou estáveis) de epicentros de catálogos sísmicos lançando-se mão de técnicas de suavização.

Petersen et al. (2018b) desenvolveram mapas de aceleração para probabilidades de excedência de 2%, 10% e 50% em 50 anos (Figura 41 e Figura 42) que representam níveis de movimentos do solo raros, possíveis e comuns, respectivamente.

Observa-se nos mapas que, no Brasil, foram definidas poucas fontes sísmicas, constatando, na Figura 41 e na Figura 42, apenas alguns pontos no Nordeste e no Centro-Oeste. Os estados do MT, CE e RN apresentaram, de maneira geral, os maiores potenciais sísmicos no território brasileiro com valores que variam de 0,2 a 0,3g para 10% de probabilidade em 50 anos.

Figura 41: Mapas de perigo sísmico de 2% e 10% de probabilidade de excedência em 50 anos propostos por Petersen et al. (2018b).



Fonte: Adaptado de Petersen et al. (2018b).

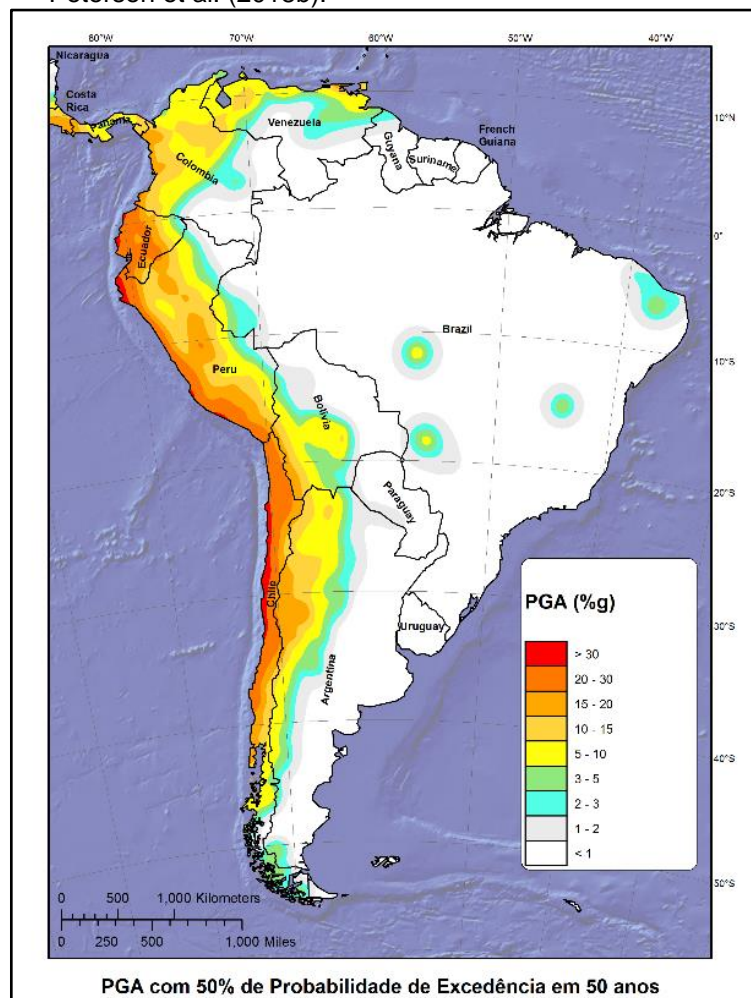
### 5.1.3.2 GMPE utilizadas

Petersen et al. (2018b) usou, na construção dos mapas, diversas GMPEs com diferentes pesos aplicados para cada uma delas (Tabela 11). Para fontes sísmicas do tipo “falha em regiões crustais ativas”, foram usadas cinco GMPEs; para as fontes do tipo “interface de subducção”, três GMPEs; para as regiões “estáveis”, oito diferentes



GMPEs; e, por último, para áreas “ativas profundas”, em que foram usadas técnicas de suavização, há quatro GMPEs.

Figura 42: Mapa de perigo sísmico de 50% de probabilidade de excedência em 50 anos propostos por Petersen et al. (2018b).



Fonte: Adaptado de Petersen et al. (2018b).

Tabela 11: GMPE utilizadas para as fontes sísmicas.

GMPE	Abreviação	Pesos
<b>Regiões Crustais Ativas</b>		
Abrahamson et al. (2014)	ASK13	0,22
Boore et al. (2014)	BSSA13	0,22
Campbell and Bozorgnia (2014)	CB13	0,22
Chiou and Youngs (2014)	CY13	0,22
Idriss (2014)	I13	0,12
<b>Regiões Estáveis</b>		
Atkinson (2008')	A08'	0,08
Atkinson and Boore (2006')	AB06'	0,25
Campbell (2003)	C03	0,13
Frankel et al. (1996)	F96	0,06
Pezeshk et al. (2011)	P11	0,17
Silva et al. (2002)	S02	0,06
Tavakoli and Pezeshk (2005)	TP05	0,13
Toro et al. (1997), Toro (2002)	T02	0,12
<b>Regiões Ativas Profundas</b>		
Atkinson and Boore (2003) Cascadia Model	AB03Cascdia	0,1665
Atkinson and Boore (2003) Global Model	AB03Global	0,1665
BC Hydro (Addo et al. 2012)	BCHydro12	0,333
Zhao et al. (2006)	Zhao06	0,334
<b>Interfaces de Subducção</b>		
Atkinson and Macias (2009)	AM09	0,333
BC Hydro (Addo et al. 2012)	BCHydro12	0,333
Zhao et al. (2006)	Zhao06	0,334

Fonte: Adaptado de Petersen et al. (2018a)

## 5.2 Mapas de perigo sísmico para o RN

Neste trabalho, são propostos pelo autor mapas de perigo sísmico para o estado do Rio Grande do Norte com 10% e 2% de probabilidade de excedência em 50 anos. Para criação destes foi usado o R-CRISIS 18.4.2 através de um procedimento semelhante ao da geração de espectros de resposta e, por isso, não será detalhado no texto.

No primeiro mapa gerado (Figura 43), foram usados os mesmos parâmetros (tipo de fonte, caracterização de sismicidade, GMPE e etc) que o espectro de resposta da Figura 34, sendo que este mapa foi gerado para  $T=0s$ , isto é, para o PGA com probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

O segundo (Figura 44), foi gerado com os mesmos parâmetros do mapa anterior, exceto com relação a GMPE que foi adotada como sendo um modelo híbrido de diversas equações de movimento do solo semelhante ao realizado por Petersen et al. (2018a) para regiões de estáveis.

Como o R-CRISIS não têm, em suas funções construídas, as seguintes GMPES: Frankel et al. (1996), Silva et al. (2002) e Toro (2002); foi necessário proceder

à readequação dos pesos dos demais modelos de movimento propostos em relação às GMPEs da Tabela 11 para regiões estáveis. A Tabela 12 mostra os pesos e equações de movimento adotadas para geração do mapa da Figura 44.

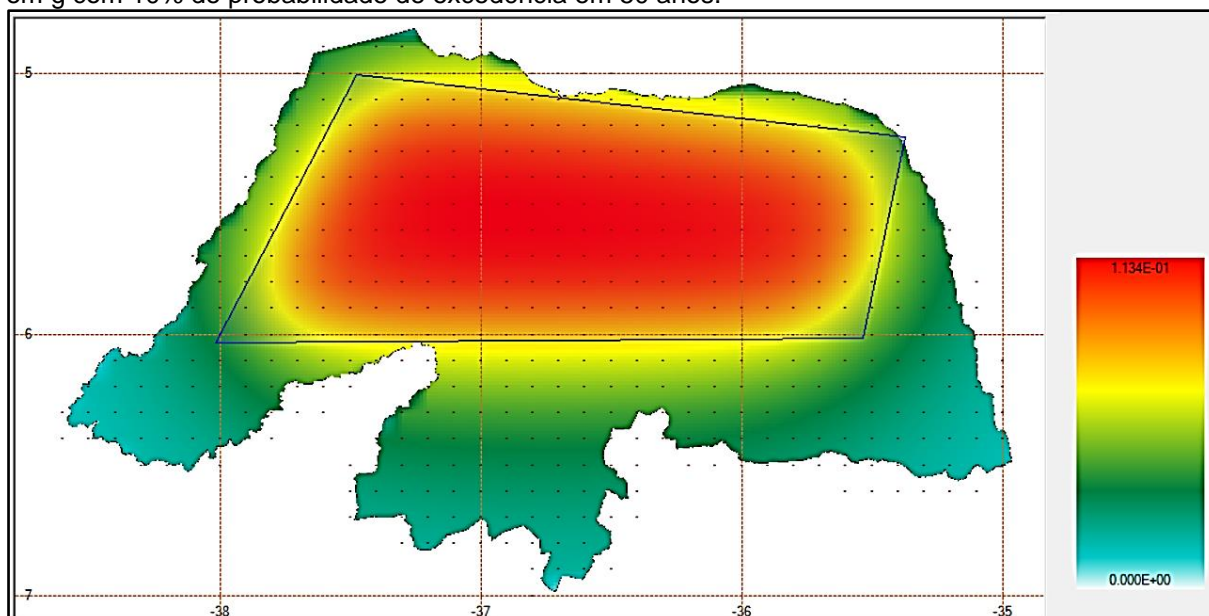
Observa-se que ambos os mapas têm a forma de distribuição de acelerações muito semelhantes, confirmando a expectativa inicial, uma vez que eles tinham a mesma fonte e a malha de pontos criada para o estado também teve a mesma densidade. Entretanto, o segundo mostrou-se com acelerações superiores (0,16 g) ao primeiro mapa (0,11 g) como pôde ser constatado pelas acelerações máximas apresentadas na legenda à direita de cada mapa.

Tabela 12: GMPE e pesos utilizados no modelo híbrido.

GMPE	Pesos
Atkinson (2008')	0.098
Atkinson and Boore (2006')	0.305
Campbell (2003)	0.159
Pezeshk et al. (2011)	0.207
Tavakoli and Pezeshk (2005)	0.159
Toro et al. (1997),	0.073

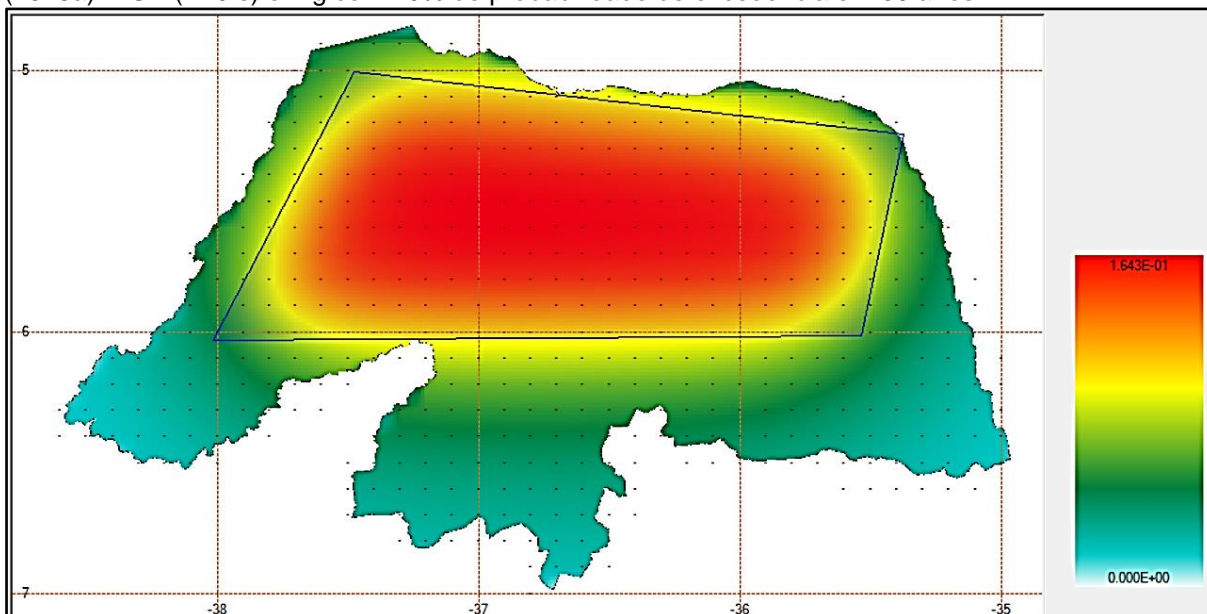
Fonte: Autor (2019)

Figura 43: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE de Toro et al. (1997). PGA ( $T=0$  s) em g com 10% de probabilidade de excedência em 50 anos.



Fonte: Adaptado do R-CRISIS 18.4.2

Figura 44: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE híbrida conforme Petersen et al. (2018a). PGA (T=0 s) em g com 10% de probabilidade de excedência em 50 anos.

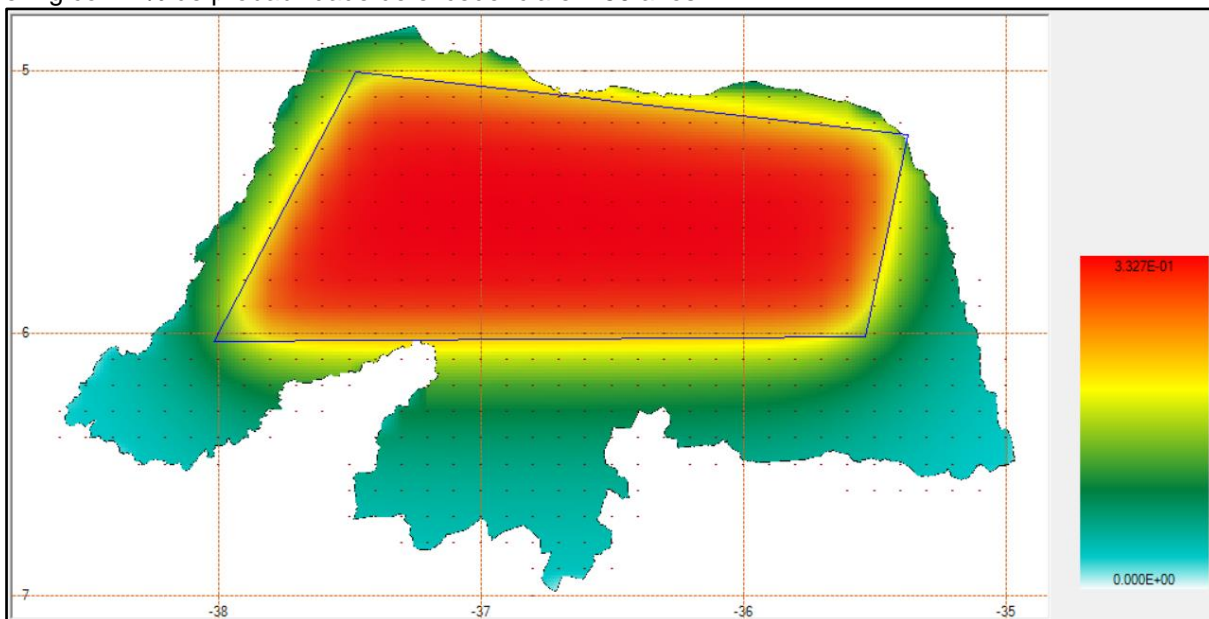


Fonte: Adaptado do R-CRISIS 18.4.2.

Em algumas normas internacionais é comum o uso de mapas de perigo sísmico mais rigorosos com probabilidade de excedência de 2% em 50 anos (2.475 anos de período de retorno), conseqüentemente, o valor de aceleração se torna superior. Tendo isso em vista foram gerados com o *software* R-CRISIS dois mapas de perigo sísmico para o RN com esta probabilidade. Tal como realizado anteriormente um deles foi gerado para a GMPE de Toro et al. (1997) (Figura 45) e o outro para a GMPE híbrida conforme proposto por Petersen et al. (2018) (Figura 46). Observa-se que o primeiro apresenta acelerações máximas de 0,33 g e o segundo de 0,51 g. Assim, o aumento médio do valor de aceleração nestes últimos mapas foi cerca de 3,1 vezes com relação àqueles com probabilidade de 10%.

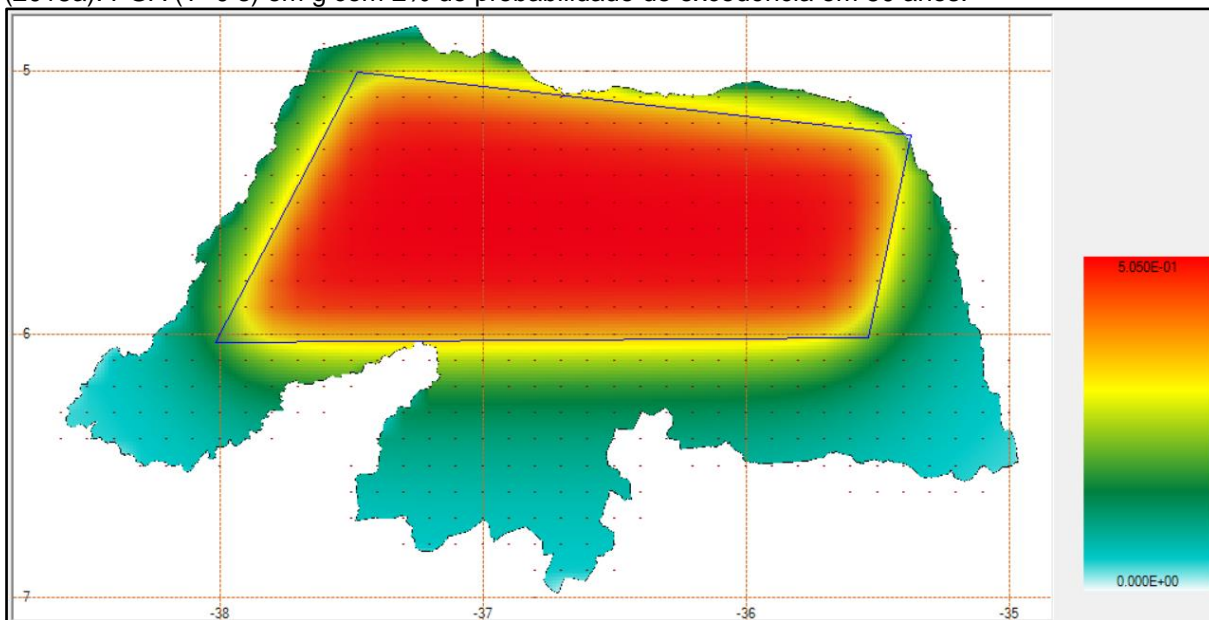


Figura 45: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE de Toro et al. (1997). PGA (T=0 s) em g com 2% de probabilidade de excedência em 50 anos.



Fonte: Adaptado do R-CRISIS 18.4.2.

Figura 46: Mapa de perigo sísmico gerado para o RN com GMPE híbrida conforme Petersen et al. (2018a). PGA (T=0 s) em g com 2% de probabilidade de excedência em 50 anos.



Fonte: Adaptado do R-CRISIS 18.4.2.

## 6. TESTES COMPLEMENTARES COM O R-CRISIS 18.4.2

### 6.1 Proporção das dimensões de falha (“Aspect ratio”)

Segundo Ordaz e Salgado-Gálvez (2019), a proporção das dimensões é um parâmetro que caracteriza a área de ruptura da falha tomada como a fonte sísmica da análise. Na construção do espectro realizada no item 4.4, a proporção das dimensões foi igual a 0,6 e os valores de acelerações espectrais calculados foram usados como referência. Diante disso, foi observado como os valores dessa variável afetavam nas respostas do *software* para as acelerações espectrais de cada período determinado. Foram analisadas proporções das dimensões de falha iguais a: 0,1; 0,3; 0,5 e 0,9.

Tabela 13: Variação da proporção das dimensões e variações percentuais dos valores de aceleração de cada período do espectro de resposta.

Período (s)	Taxa de aspecto								
	0,1		0,3		0,5		0,6	0,9	
	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)	a(g)	Δ%
0,00E+00	1,31E-01	15,57%	1,18E-01	4,39%	1,14E-01	1,00%	1,13E-01	1,11E-01	1,92%
2,86E-02	3,06E-01	16,35%	2,76E-01	4,79%	2,67E-01	1,24%	2,63E-01	2,57E-01	2,36%
4,00E-02	3,16E-01	15,55%	2,86E-01	4,39%	2,77E-01	1,00%	2,74E-01	2,69E-01	1,91%
1,00E-01	2,69E-01	15,38%	2,43E-01	4,39%	2,36E-01	1,00%	2,33E-01	2,29E-01	1,92%
2,00E-01	2,12E-01	13,02%	1,95E-01	3,71%	1,89E-01	0,85%	1,88E-01	1,85E-01	1,63%
4,00E-01	1,26E-01	12,24%	1,16E-01	3,52%	1,13E-01	0,81%	1,12E-01	1,10E-01	1,54%
1,00E+00	4,75E-02	11,08%	4,41E-02	3,20%	4,31E-02	0,74%	4,28E-02	4,22E-02	1,41%
1,50E+00	3,25E-02	11,60%	3,01E-02	3,35%	2,93E-02	0,77%	2,91E-02	2,87E-02	1,48%
2,00E+00	1,77E-02	11,73%	1,63E-02	3,38%	1,59E-02	0,78%	1,58E-02	1,56E-02	1,51%

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que as maiores variações percentuais ocorreram quando o valor de proporção das dimensões de falha foi definido como 0,1. Entretanto, estes não ultrapassaram o valor de 17% enquanto a diferença da taxa de aspecto foi de 83,33% (entre 0,1 e 0,6, tomando o último valor como referência).

### 6.2 Coeficiente de variação (CV) de $\beta$

O coeficiente de variação é um parâmetro estatístico que mede a dispersão de uma variável (para este caso é o  $\beta$ , que está diretamente ligado ao valor de b da lei de recorrência como mostrado no item 4.4.3) em torno da média. O valor usado na análise do item 4.4 foi 0,166, conforme o trabalho de Dourado (2014). Para testar como o CV afeta na resposta das acelerações espectrais foram usados os valores: 0,09; 0,5; 0,9 e 0,314.

Tabela 14: Variação do coeficiente de variação de  $\beta$  e diferenças percentuais dos valores de aceleração de cada período do espectro de resposta.

Período (s)	CV $\beta$								
	0,09		0,166	0,314		0,5		0,9	
	a(g)	a(g)	a(g)	a(g)	$\Delta\%$	a(g)	$\Delta\%$	a(g)	$\Delta\%$
0,00E+00	1,12E-01	0,8%	1,13E-01	1,15E-01	2,2%	1,19E-01	5,5%	1,28E-01	13,8%
2,86E-02	2,61E-01	0,8%	2,63E-01	2,68E-01	2,2%	2,76E-01	5,0%	2,95E-01	12,1%
4,00E-02	2,71E-01	0,7%	2,73E-01	2,79E-01	2,0%	2,87E-01	4,9%	3,06E-01	12,1%
1,00E-01	2,31E-01	0,9%	2,33E-01	2,38E-01	2,3%	2,46E-01	5,8%	2,67E-01	14,6%
2,00E-01	1,86E-01	0,8%	1,88E-01	1,92E-01	2,3%	1,98E-01	5,7%	2,14E-01	14,1%
4,00E-01	1,11E-01	1,1%	1,12E-01	1,15E-01	3,1%	1,21E-01	7,8%	1,34E-01	19,6%
1,00E+00	4,20E-02	1,7%	4,27E-02	4,47E-02	4,5%	4,76E-02	11,5%	5,53E-02	29,4%
1,50E+00	2,85E-02	1,9%	2,91E-02	3,06E-02	5,4%	3,31E-02	13,7%	3,93E-02	35,2%
2,00E+00	1,54E-02	2,6%	1,58E-02	1,69E-02	7,2%	1,87E-02	18,6%	2,29E-02	45,0%

Fonte: Autor (2019)

A maior diferença percentual foi de 45% para o CV igual a 0,9. Entretanto, foi necessário aumentar mais de 400% do valor do coeficiente de variação para chegar a essa diferença na resposta de aceleração. Adicionalmente, pode-se observar que as maiores diferenças sempre ocorrem para os maiores períodos em que há menores acelerações espectrais e, conseqüentemente, o efeito do sismo na estrutura tende a ser mais baixo. No trabalho de Dourado (2014) o maior valor do CV de  $\beta$  foi de 0,314 na fonte sísmica Nordeste 2.

### 6.3 Profundidade da fonte

Para avaliar a influência da profundidade foram escolhidos os valores de 10, 50 e 100 km e comparados com os valores de aceleração espectral obtido com a profundidade de 5 km.

Tabela 15: Análise da influência da profundidade da fonte nas acelerações espectrais.

Período (s)	Profundidade (km)						
	5	10		50		100	
	a(g)	a(g)	$\Delta\%$	a(g)	$\Delta\%$	a(g)	$\Delta\%$
0,00E+00	1,13E-01	1,13E-01	0,00%	1,13E-01	0,03%	1,12E-01	0,44%
2,86E-02	2,63E-01	2,63E-01	0,00%	2,63E-01	0,03%	2,61E-01	0,61%
4,00E-02	2,73E-01	2,73E-01	0,00%	2,73E-01	0,03%	2,72E-01	0,48%
1,00E-01	2,33E-01	2,33E-01	0,00%	2,33E-01	0,03%	2,32E-01	0,43%
2,00E-01	1,88E-01	1,88E-01	0,00%	1,87E-01	0,03%	1,87E-01	0,34%
4,00E-01	1,12E-01	1,12E-01	0,00%	1,12E-01	0,04%	1,12E-01	0,29%
1,00E+00	4,27E-02	4,27E-02	0,00%	4,27E-02	0,04%	4,26E-02	0,22%
1,50E+00	2,91E-02	2,91E-02	0,00%	2,91E-02	0,04%	2,90E-02	0,21%
2,00E+00	1,58E-02	1,58E-02	0,00%	1,58E-02	0,05%	1,58E-02	0,20%

Fonte: Autor (2019)

No geral, as alterações de profundidade resultaram em mudanças insignificativas nos valores de acelerações espectrais. Entretanto, é importante observar que pode ser que para outras GMPEs esse parâmetro venha a ter maiores influências.

#### 6.4 Direção de mergulho (“Dip”)

O ângulo de mergulho é outro parâmetro que caracteriza a geometria da falha. De acordo com o manual do R-CRISIS esse valor deve variar entre 0° e 90°. Por isso, avaliou-se a influência desse parâmetro nos valores de acelerações espectrais (*SA*) para 10°, 30° e 60° comparando-os com os valores obtidos adotando-se a direção de mergulho a 90°.

Tabela 16: Análise da influência da direção de mergulho nas acelerações espectrais.

Período (s)	Direção de mergulho (°)						
	10		30		60		90
	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)
0,00E+00	1,18E-01	4,6%	1,17E-01	3,8%	1,15E-01	1,7%	1,13E-01
2,86E-02	2,76E-01	4,9%	2,74E-01	4,2%	2,68E-01	2,0%	2,63E-01
4,00E-02	2,86E-01	4,5%	2,84E-01	3,8%	2,78E-01	1,7%	2,73E-01
1,00E-01	2,43E-01	4,5%	2,42E-01	3,8%	2,37E-01	1,7%	2,33E-01
2,00E-01	1,95E-01	3,9%	1,94E-01	3,3%	1,90E-01	1,5%	1,88E-01
4,00E-01	1,16E-01	3,7%	1,15E-01	3,1%	1,13E-01	1,4%	1,12E-01
1,00E+00	4,42E-02	3,4%	4,39E-02	2,9%	4,32E-02	1,3%	4,27E-02
1,50E+00	3,01E-02	3,5%	3,00E-02	3,0%	2,95E-02	1,3%	2,91E-02
2,00E+00	1,64E-02	3,6%	1,63E-02	3,0%	1,60E-02	1,3%	1,58E-02

Fonte: Autor (2019)

O parâmetro analisado teve pouquíssima influência na resposta das acelerações espectrais.

#### 6.5 Intervalo de incerteza da magnitude máxima ( $\mu$ )

Esse parâmetro é inserido nos dados de sismicidade do R-CRISIS e indica o quanto a magnitude máxima poderá variar (para mais ou para menos) em relação a média. Foram avaliados os seguintes intervalos de incerteza: 0,1; 0,5; 0,9 e 2. As respostas de aceleração espectral foram comparadas adotando, como referência, o valor de  $\mu$  igual a 0,3.

As diferenças percentuais não foram muito significativas chegando, no máximo, a 16,55% para os valores de intervalo de incerteza analisados. As diferenças mais

consideráveis ocorreram para períodos também mais elevados que têm menores acelerações espectrais e tendem a gerar mais baixos valores de esforços nas estruturas.

Tabela 17: Análise da influência do intervalo de incerteza da  $\mu$  nas acelerações espectrais.

Período (s)	Intervalo de incerteza de $\mu$								
	0,1		0,3	0,5		0,9		2	
	a(g)	$\Delta\%$	a(g)	a(g)	$\Delta\%$	a(g)	$\Delta\%$	a(g)	$\Delta\%$
0,00E+00	1,13E-01	0,6%	1,12E-01	1,12E-01	0,2%	1,12E-01	0,6%	1,07E-01	5,1%
2,86E-02	2,63E-01	0,7%	2,61E-01	2,62E-01	0,4%	2,60E-01	0,5%	2,48E-01	5,2%
4,00E-02	2,74E-01	0,6%	2,72E-01	2,73E-01	0,3%	2,71E-01	0,5%	2,58E-01	5,1%
1,00E-01	2,33E-01	0,6%	2,32E-01	2,32E-01	0,2%	2,30E-01	0,7%	2,19E-01	5,4%
2,00E-01	1,88E-01	0,5%	1,87E-01	1,87E-01	0,1%	1,85E-01	0,8%	1,77E-01	5,3%
4,00E-01	1,12E-01	0,5%	1,12E-01	1,11E-01	0,1%	1,10E-01	1,4%	1,03E-01	7,7%
1,00E+00	4,28E-02	0,5%	4,26E-02	4,25E-02	0,4%	4,16E-02	2,4%	3,77E-02	11,5%
1,50E+00	2,92E-02	0,6%	2,90E-02	2,89E-02	0,5%	2,82E-02	2,9%	2,53E-02	12,7%
2,00E+00	1,59E-02	0,7%	1,58E-02	1,56E-02	0,8%	1,51E-02	4,2%	1,31E-02	16,6%

Fonte: Autor (2019)

## 6.6 Parâmetro $K_1$ e $K_2$

Segundo Ordaz e Salgado-Gálvez (2019), esses dois parâmetros são usados pelo R-CRISIS na definição das áreas de ruptura da fonte sísmica e têm sua importância quando é avaliada a distância do local de análise até a fonte geradora do sismo. O *software* tem um conjunto de pares  $K_1$  e  $K_2$  previamente estabelecidos por autores que fizeram estudos para determinação destes parâmetros conforme a Tabela 18.

Tabela 18: Pares  $K_1$  e  $K_2$  estabelecidos no R-CRISIS.

Modelo	$K_1$	$K_2$
Brune (1970)	0,00381	1,1513
Singh et al, (1980)	0,00564	1,1513
Wells and Coppersmith (1994) Strike-slip	0,011	1,03616
Wells and Coppersmith (1994) Reverse	0,00571	1,12827
Wells and Coppersmith (1994) Normal	0,02072	0,94406
Wells and Coppersmith (1994) Generic	0,01015	1,04768

Fonte: Ordaz e Salgado-Gálvez (2019).

Na Tabela 19 observa-se que as diferenças das respostas de acelerações espectrais foram pouco significativas quando se variou o par  $K_1$  e  $K_2$  para os diversos valores presentes no R-CRISIS. A comparação de acelerações foi feita tomando como referência os valores obtidos ao adotar “Wells and Coppersmith (1994) – Generic”.

Tabela 19: Análise da influência do valor dos parâmetros K1 e K2 nas acelerações espectrais.

Período (s)	Ks						
	Brune		Singh		WeC(strike-slip)		WeC(generic)
	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)
0,00E+00	1,09E-01	3,28%	1,13E-01	0,15%	1,13E-01	0,18%	1,13E-01
2,86E-02	2,52E-01	4,05%	2,63E-01	0,16%	2,63E-01	0,21%	2,63E-01
4,00E-02	2,64E-01	3,51%	2,74E-01	0,14%	2,74E-01	0,17%	2,73E-01
1,00E-01	2,25E-01	3,29%	2,33E-01	0,15%	2,33E-01	0,17%	2,33E-01
2,00E-01	1,82E-01	2,81%	1,88E-01	0,14%	1,88E-01	0,14%	1,88E-01
4,00E-01	1,09E-01	2,66%	1,12E-01	0,15%	1,12E-01	0,13%	1,12E-01
1,00E+00	4,17E-02	2,38%	4,28E-02	0,16%	4,28E-02	0,12%	4,27E-02
1,50E+00	2,84E-02	2,49%	2,91E-02	0,18%	2,91E-02	0,12%	2,91E-02
2,00E+00	1,54E-02	2,50%	1,58E-02	0,20%	1,58E-02	0,13%	1,58E-02

Fonte: Autor (2019)

Tabela 19: Análise da influência do valor dos parâmetros K1 e K2 nas acelerações espectrais (continuação).

Período (s)	Ks				
	WeC(normal)		WeC(reverse)		WeC(generic)
	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)
0,00E+00	1,14E-01	1,33%	1,12E-01	1,06%	1,13E-01
2,86E-02	2,67E-01	1,66%	2,59E-01	1,32%	2,63E-01
4,00E-02	2,77E-01	1,33%	2,70E-01	1,07%	2,73E-01
1,00E-01	2,36E-01	1,32%	2,30E-01	1,07%	2,33E-01
2,00E-01	1,90E-01	1,11%	1,86E-01	0,90%	1,88E-01
4,00E-01	1,13E-01	1,02%	1,11E-01	0,84%	1,12E-01
1,00E+00	4,31E-02	0,90%	4,24E-02	0,75%	4,27E-02
1,50E+00	2,94E-02	0,94%	2,89E-02	0,77%	2,91E-02
2,00E+00	1,59E-02	0,92%	1,57E-02	0,77%	1,58E-02

Fonte: Autor (2019)

## 6.7 Ângulo strike

O “strike” da falha é o ângulo que a linha da falha no plano horizontal faz relativo ao Norte geográfico. Esse valor pode variar de 0° a 360°. Os valores analisados foram 50°, 100°, 150°. Estes foram comparados com as respostas de acelerações espectrais para Strike igual a 220°.

A influência desse parâmetro nos valores finais de aceleração espectral se mostrou pouco significativa.

Tabela 20: Análise da influência do valor “Strike” nas acelerações espectrais.

Período (s)	Strike (°)						
	50		100		150		220
	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)	Δ%	a(g)
<b>0,00E+00</b>	1,13E-01	0,30%	1,14E-01	1,05%	1,13E-01	0,19%	<a href="#">1,13E-01</a>
<b>2,86E-02</b>	2,64E-01	0,35%	2,66E-01	1,20%	2,63E-01	0,20%	<a href="#">2,63E-01</a>
<b>4,00E-02</b>	2,75E-01	0,29%	2,77E-01	1,02%	2,73E-01	0,17%	<a href="#">2,74E-01</a>
<b>1,00E-01</b>	2,34E-01	0,33%	2,36E-01	1,14%	2,33E-01	0,20%	<a href="#">2,33E-01</a>
<b>2,00E-01</b>	1,88E-01	0,31%	1,90E-01	1,04%	1,87E-01	0,21%	<a href="#">1,88E-01</a>
<b>4,00E-01</b>	1,12E-01	0,36%	1,13E-01	1,18%	1,12E-01	0,25%	<a href="#">1,12E-01</a>
<b>1,00E+00</b>	4,29E-02	0,38%	4,33E-02	1,25%	4,26E-02	0,29%	<a href="#">4,28E-02</a>
<b>1,50E+00</b>	2,92E-02	0,41%	2,95E-02	1,34%	2,90E-02	0,32%	<a href="#">2,91E-02</a>
<b>2,00E+00</b>	1,59E-02	0,45%	1,60E-02	1,46%	1,57E-02	0,37%	<a href="#">1,58E-02</a>

Fonte: Autor (2019)

## 7. ANÁLISE SÍSMICA ESPECTRAL

### 7.1 Fundamentos da análise modal

A expressão matricial geral (Equação 21) que rege o movimento de um sistema estrutural é dada por três parcelas: a primeira representando as forças inerciais ( $[M]\{\ddot{U}\}$ ); a segunda, as forças de amortecimento ( $[C]\{\dot{U}\}$ ); a terceira denota as forças restauradoras elásticas ( $[K]\{U\}$ ).  $\{F(t)\}$  são as forças externas.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\} \quad \text{Equação 21}$$

Em que:

- $[M]$  é a matriz de massa;
- $\{\ddot{U}\}$  é o vetor de acelerações (derivada segunda dos deslocamentos);
- $[C]$  é a matriz de amortecimento;
- $\{\dot{U}\}$  é o vetor de velocidade (derivada primeira dos deslocamentos);
- $[K]$  é a matriz de rigidez;
- $\{U\}$  é o vetor de deslocamentos;

Se uma estrutura tem N graus de liberdade, o sistema resultante da Equação 21 tem ordem N.

Na análise modal é realizado o desacoplamento das N equações<sup>14</sup>, tornando-as independentes entre si. Assim, um sistema com N graus de liberdade passa a ser representado por N sistemas de um grau de liberdade. Isso é possível, pois considera-se que a estrutura esteja no regime elástico linear. Dessa forma, a equação independente que representa o i-ésimo modo de vibração de uma estrutura arbitrária é, segundo Guadalupe (1996):

---

<sup>14</sup> Para realizar esse desacoplamento são necessárias que algumas condições matemáticas sejam satisfeitas, porém elas são propositalmente omitidas, porque fogem do escopo deste trabalho.



$$\ddot{y}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{y}_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = F_i \quad \text{Equação 22}$$

Em que:

- $y_i$  é a coordenada modal do i-ésimo modo de vibração;
- $\xi_i = \frac{c}{2m\omega_n}$  é a taxa de amortecimento;
- $\omega_i$  é a frequência natural circular da estrutura em radianos;
- $F_i$  é a força a que o sistema está submetido e que varia no tempo.

Segundo Guadalupe (1996), o vetor de deslocamento da estrutura pode então ser obtido pela soma de cada modo de vibração ( $[\Phi]_i$ ) multiplicado pela sua respectiva coordenada modal ( $y_i(t)$ ):

$$\{U\} = \sum_{i=1}^N \{\Phi\}_i y_i(t) \quad \text{Equação 23}$$

Os modos e frequências são analisados considerando o problema dinâmico como sendo de vibrações livres não amortecidas podendo ser obtidos pela resolução do problema de autovalor (frequências) e autovetor (modos de vibração livres não amortecido,  $\{\Phi\}$ ) da equação abaixo:

$$([K] - \omega^2[M])\{\Phi\} = 0 \quad \text{Equação 24}$$

## 7.2 Análise espectral

Como os espectros são construídos com diversos sistemas com um único grau de liberdade (SDOF), a resposta (deslocamentos, esforços) de uma estrutura SDOF obtida por análise espectral seria igual ao maior valor da resposta obtida por uma análise de história no tempo. Porém, em se tratando dos resultados de uma estrutura com múltiplos graus de liberdade (MDOF), as respostas máximas obtidas pela análise se tratam apenas de estimativas, não correspondendo exatamente à máxima resposta obtida de uma análise de história no tempo. (CHOPRA, 2012)

Quando o sistema estrutural é submetido à ação sísmica amortecida, normalmente considera-se que a Equação 21 e a Equação 22 são mais bem representadas pelas expressões da Equação 25 e Equação 26, respectivamente:

$$[M]\{\ddot{U}_r\} + [C]\{\dot{U}_r\} + [K]\{U_r\} = -[M]I\{\ddot{u}_g\} \quad \text{Equação 25}$$

$$\ddot{y}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{y}_i(t) + \omega_i^2y_i(t) = -\Gamma_i\ddot{u}_g(t) \quad \text{Equação 26}$$

Em que:

- $\ddot{u}_g$  é a aceleração horizontal da base provocada pelo sismo;
- $\{\dot{U}_r\} = \{\dot{U}_t\} - \{\ddot{u}_g\}$  é a aceleração relativa resultante da subtração entre aceleração total e aceleração da base;
- $\Gamma_i = \{\Phi\}_i^T [M] I$  é o fator de participação modal e  $I$  é uma matriz unitária.

É importante observar que, durante a ação sísmica,  $y_i$ ,  $\dot{y}_i$ ,  $\ddot{y}_i$  e  $\ddot{u}_g$  são variáveis no tempo. Isto implica que seria necessário resolver, pelo procedimento normal da análise modal, a Equação 26 para obter os diversos valores das coordenadas modais em todo o tempo em que a ação sísmica atua na estrutura podendo-se determinar, através da Equação 23, a resposta da estrutura no tempo. Entretanto, conforme Guadalupe (1996), ao invés de calcular toda a resposta no tempo pode-se, alternativamente, calcular apenas os valores máximos da resposta da estrutura através da expressão:

$$\{u_r\}_i = S_{di}\Gamma_i\{\Phi\}_i \quad \text{Equação 27}$$

Em que:

- $\{u_r\}_i$  é vetor de resposta máxima de deslocamento i-ésimo modo da estrutura;
- $S_{di}$  é o valor de deslocamento obtido através do espectro de resposta para uma frequência equivalente ao i-ésimo modo.

De forma geral, os espectros das normas são comumente respostas de acelerações, por isso, é necessário proceder à transformação da aceleração em deslocamento através da multiplicação por  $1/\omega_i^2$ . Logo, a Equação 27 toma a forma:

$$\{u_r\}_i = \frac{1}{\omega_i^2} S_{ai} \Gamma_i \{\Phi\}_i \quad \text{Equação 28}$$

Em que:

- $S_{ai}$  é o valor de aceleração obtido através do espectro de resposta para uma frequência equivalente ao i-ésimo modo;
- $\frac{1}{\omega_i^2} S_{ai} \Gamma_i$  é a amplitude modal do espectro de resposta do i-ésimo modo conforme definido por Medeiros (2010).

Para cada modo é obtido um vetor de respostas máximas diferentes que devem ser combinados. Porém, como as máximas respostas da estrutura, em cada modo de vibração, provavelmente não ocorrerão ao mesmo tempo, a soma algébrica desses valores levaria a um superdimensionamento da estrutura. O método da raiz quadrada da soma dos quadrados das máximas respostas (SRSS<sup>15</sup>) ou o da combinação quadrática completa (CQC<sup>16</sup>), ambos desenvolvidos, conforme Chopra (2012), por teorias de vibrações aleatórias (“*random vibrations*”), tendem a gerar respostas mais compatíveis com a realidade. O primeiro é aplicado em estruturas com valores de frequências naturais bem espaçados entre eles e o segundo é utilizado para qualquer tipo de estrutura, pois o SRSS é uma particularização do CQC. Chopra (2012) observa que para movimentos do solo de curta duração (impulsivo) e também para sismos com ciclo de carga essencialmente harmônicos esses métodos resultam em respostas inadequadas e, por isso, o uso deles não é indicado.

Segundo Chopra (2012), depois que são feitas as combinações, a resposta da análise espectral indica, na verdade, um valor médio da máxima resposta de um conjunto de excitações sísmicas. Por isso, a aplicação dos métodos de combinação é adequada dentro do contexto do uso de espectros de projetos das normas técnicas,

---

<sup>15</sup> Do inglês: Square Root of Sum of Square.

<sup>16</sup> Do inglês: Complete Quadratic Combination.

pois estes são construídos com base em diversas excitações sísmicas, não apenas de uma única e, portanto, são uma aproximação razoável da média das várias acelerações máximas de excitações individuais.

### 7.3 Procedimento para construção de espectro conforme NBR 15421:2006

#### 7.3.1 Determinação de aceleração característica ( $a_g$ )

A primeira fase para se proceder à análise espectral é determinar a aceleração característica bastando, para isso, consultar o mapeamento presente na norma (Figura 1) de acordo com o local em que a estrutura projetada será executada. O valor de  $a_g$  pode ser obtido por interpolação entre as curvas mostradas no mapa.

#### 7.3.2 Determinação da classe do terreno

Posteriormente é necessário definir, através de estudo geotécnico no local de execução do projeto, qual o tipo do terreno. O tipo de solo interfere diretamente na propagação da onda sísmica e, conseqüentemente, o valor de aceleração a que a estrutura estará submetida durante um evento sísmico é afetado.

O solo base para determinação da  $a_g$  pelo mapa da NBR 15421:2006 é do tipo rocha (classe B), assim, para outros tipos é necessário aplicar “fatores de amplificação sísmica do solo” ( $C_a$  e  $C_v$ ) para minorar ou majorar a aceleração. Solos mais moles que a rocha (classes C, D, E e F) tendem a facilitar a propagação de ondas sísmicas e, portanto, a norma brasileira considera tal efeito majorando a  $a_g$ . Os solos de classe A (Rocha sã) tem os valores de acelerações minorados.

A classe do solo pode ser determinada pelo valor de velocidade de propagação de ondas de cisalhamento ( $\overline{v_s}$ ) ou pelo valor do número médio de golpes no ensaio SPT<sup>17</sup>( $\overline{N}$ ). Como na prática é normal ter solos estratificados a norma considera os valores médios de velocidade, ou golpes, dados pelas expressões abaixo de acordo com a espessura de cada camada:

---

<sup>17</sup> Do inglês: *Standard Penetration Test*

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad \text{Equação 29}$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad \text{Equação 30}$$

A partir de um desses valores define-se a classe do terreno de acordo com a Tabela 21.

Tabela 21: Classe do terreno de acordo com a NBR 15421:2006 (Tabela 2).

Classe do terreno	Designação da classe do terreno	Propriedades médias para os 30 m superiores do terreno	
		$\bar{v}_s$	$\bar{N}$
A	Rocha Sã	$\bar{v}_s \geq 1500 \text{ m/s}$	(não aplicável)
B	Rocha	$1500 \text{ m/s} \geq \bar{v}_s \geq 760 \text{ m/s}$	(não aplicável)
C	Rocha Alterada ou solo muito rígido	$760 \text{ m/s} \geq \bar{v}_s \geq 370 \text{ m/s}$	$\bar{N} \geq 50$
D	Solo rígido	$370 \text{ m/s} \geq \bar{v}_s \geq 180 \text{ m/s}$	$50 \geq \bar{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\bar{v}_s \leq 180 \text{ m/s}$	$\bar{N} \leq 15$
	-	Qualquer perfil, incluindo camada com mais de 3 m de argila mole	
F	-	Solo exigindo avaliação específica, como: 1 Solos vulneráveis à ação sísmica, como solos liquefazíveis, argilas muito sensíveis e solos colapsíveis fracamente cimentados; 2 Turfas ou argilas muito orgânicas; 3 Argilas muito plásticas; 4 Estratos muito espessos ( $\geq 35 \text{ m}$ ) de argila mole ou média.	

Fonte: Adaptado de NBR 15421:2006.

### 7.3.3 Determinação do espectro de resposta de projeto

Definido a classe do terreno (item 7.3.2) é necessário determinar os fatores de amplificação do terreno para os períodos 0,0s ( $C_a$ ) e 1,0s ( $C_v$ ).

Tabela 22: Fatores de amplificação do terreno.

Classe do terreno	$C_a$		$C_v$	
	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$	$a_g \leq 0,10g$	$a_g = 0,15g$
A	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,7	1,7
D	1,6	1,5	2,4	2,2
E	2,5	2,1	3,5	3,4

Fonte: Adaptado de Tabela 3 da NBR 15421:2006.

Determinados os  $C_a$  e  $C_v$  pode-se proceder à definição do espectro de projeto que, na NBR 15421:2006, é constituído de três partes as quais são designadas pelas equações (nos intervalos especificados abaixo) como mostrado na Figura 47:

$$S_a(T) = a_{gs0} \left( 18,75T * \frac{C_a}{C_v} + 1,0 \right) \quad 0 \leq T \leq 0,08C_v/C_a \quad \text{Equação 31}$$

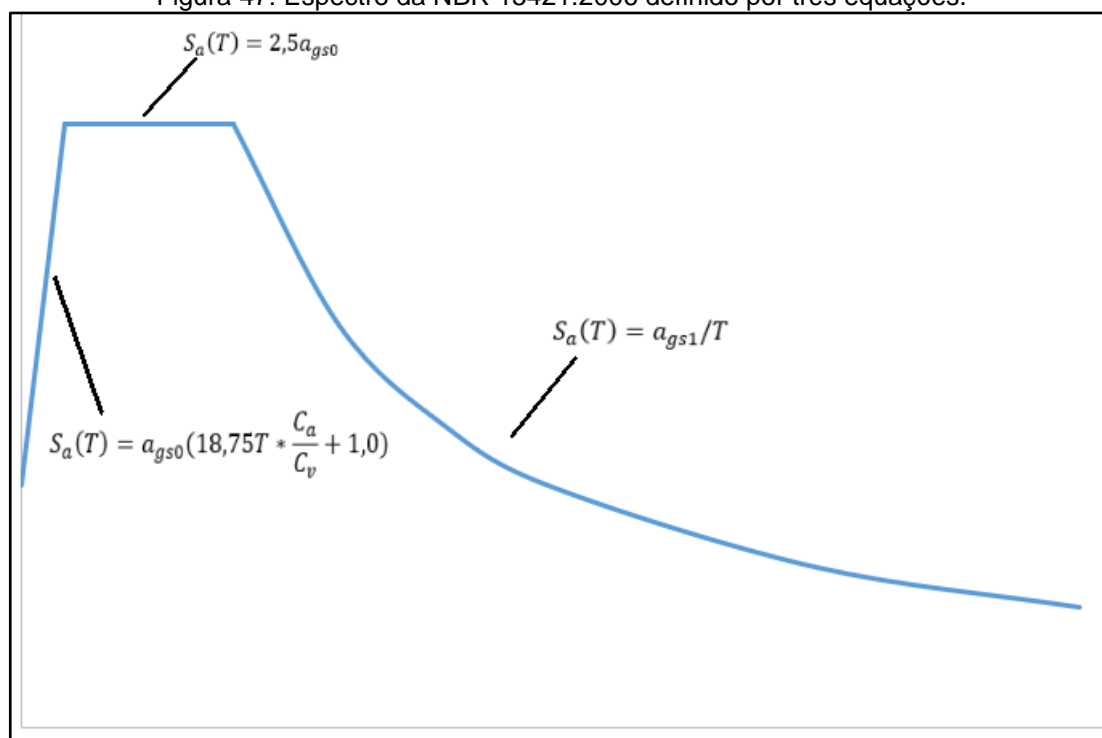
$$S_a(T) = 2,5a_{gs0} \quad 0,08C_v/C_a \leq T \leq 0,4C_v/C_a \quad \text{Equação 32}$$

$$S_a(T) = a_{gs1}/T \quad T \geq 0,4C_v/C_a \quad \text{Equação 33}$$

Em que:

- $T$  é o período natural da estrutura;
- $a_{gs0} = C_a * a_g$  é a aceleração espectral para o período de 0,0s;
- $a_{gs1} = C_v * a_g$  é a aceleração espectral para o período de 1,0s;
- $S_a(T)$  é a máxima resposta de aceleração da estrutura variando com  $T$ .

Figura 47: Espectro da NBR 15421:2006 definido por três equações.



Fonte: Autor (2019)

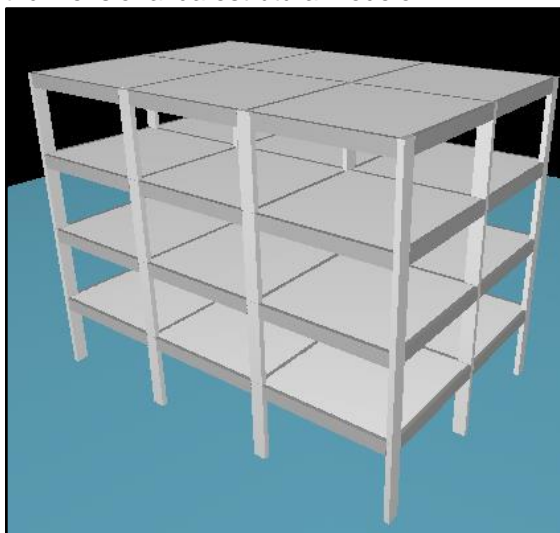
#### 7.4 Aplicação de análise sísmica espectral pela NBR 15421:2006

Como já mencionado anteriormente, o espectro de resposta é muito importante dentro da engenharia, tendo aplicação na análise sísmica de estruturas pelo método espectral. Dessa forma, pretende-se aqui construir o espectro de resposta e utilizá-lo na análise espectral de duas estruturas modelo pelo software TQS 21.3.

As estruturas modelos são, ambas, bastante simples, constituídas de três pórticos em concreto armado em uma direção e dois na outra todos eles distanciados 5 m entre si. O pé direito é de 3 m.

O primeiro modelo tem quatro pavimentos com lajes maciças de 15 cm, área em planta 500 cm x 500 cm com cargas acidentais e permanentes de 0,2 tf/m<sup>2</sup> cada; vigas com seção transversal de 14 cm x 50 cm e carga permanente de alvenaria de 0,5 tf/m; e pilares de 20 cm x 50 cm.

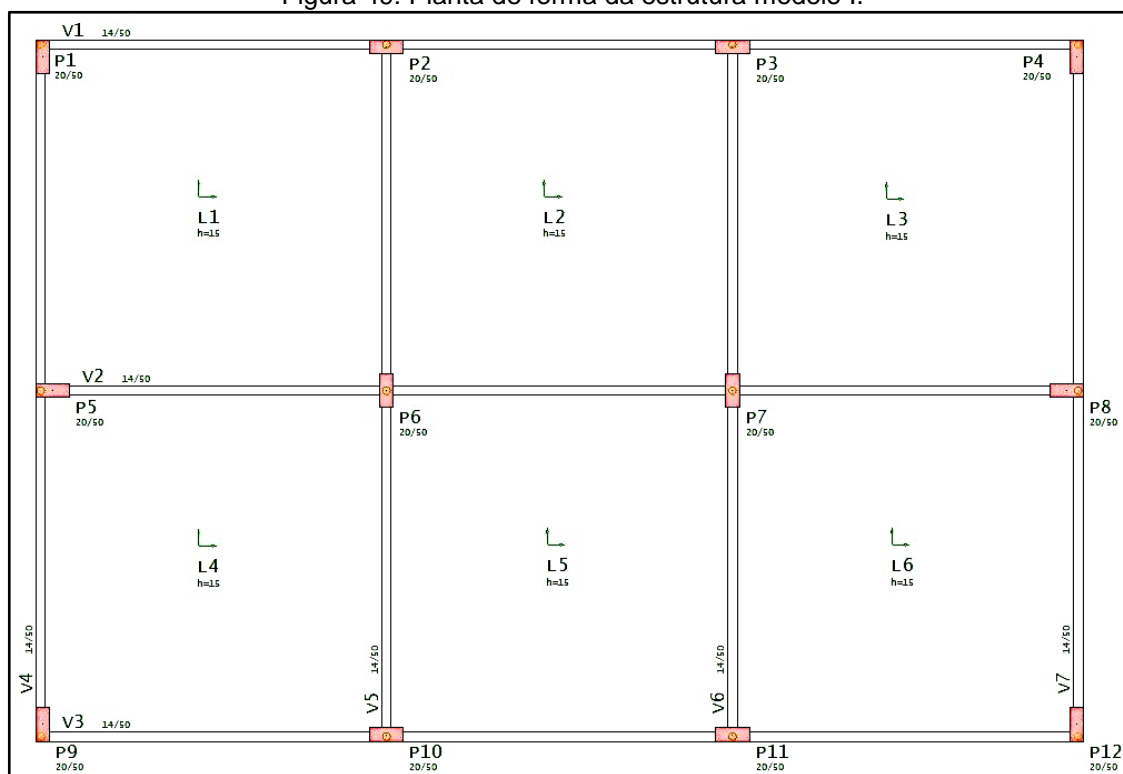
Figura 48: Representação geométrica tridimensional da estrutura modelo I



Fonte: TQS 21.3.

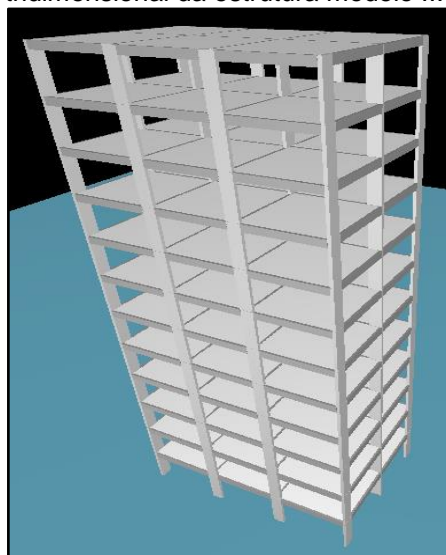
O segundo tem as mesmas características do primeiro mudando apenas a quantidade de pavimentos para 12 e a seção dos pilares para 20 cm x 80 cm.

Figura 49: Planta de forma da estrutura modelo I.



Fonte: TQS 21.3

Figura 50: Representação geométrica tridimensional da estrutura modelo II.



Fonte: TQS 21.3

#### 7.4.1 Construção de espectro segundo NBR 15421:2006

Primeiramente, a aceleração característica foi definida conforme mapa da norma para a região do RN com valor de 0,05g.



Também adotou-se a classe de terreno como solo mole (Tabela 21), pois considerou-se que a estrutura é localizada em Natal, que tem solo predominantemente arenoso e, segundo estudos de pesquisadores locais, até 4 m de profundidade apresenta, de forma geral,  $N_{spt}$  menor que 15.

Assim, os fatores de amplificação do terreno serão:  $C_a = 2,5$  e  $C_v = 3,5$ .

Com isso, os valores da aceleração espectral para os períodos 0,0 s e 1,0 s serão, respectivamente:  $a_{gs0} = 0,1g$  e  $a_{gs1} = 0,14g$ .

A partir desses dados, as três equações que definem o espectro de resposta foram determinadas:

$$S_a(T) = (1,34T + 0,1) \quad 0 \leq T \leq 0,112 \quad \text{Equação 34}$$

$$S_a(T) = 0,1 \quad 0,112 \leq T \leq 0,56 \quad \text{Equação 35}$$

$$S_a(T) = 0,14/T \quad T \geq 0,56 \quad \text{Equação 36}$$

O espectro de resposta sísmica final é mostrado na Figura 51.

Para inserção do espectro no TQS é necessário colocar o conjunto de pontos caracterizados pelos pares de valores de período (em s) e aceleração espectral (em  $m/s^2$ ) obtidos pelas Equação 34, Equação 35 e Equação 36. A Tabela 23 mostra os pontos inseridos no TQS:

No TQS é necessário adicionar um caso de carga de sismo e então colocar os pontos nas direções X e Y de acordo com um ângulo definido pelo usuário<sup>18</sup> como mostra na Figura 52. Isso é feito dentro da aba “Sismo” das cargas do tipo adicionais no editor do edifício do TQS.

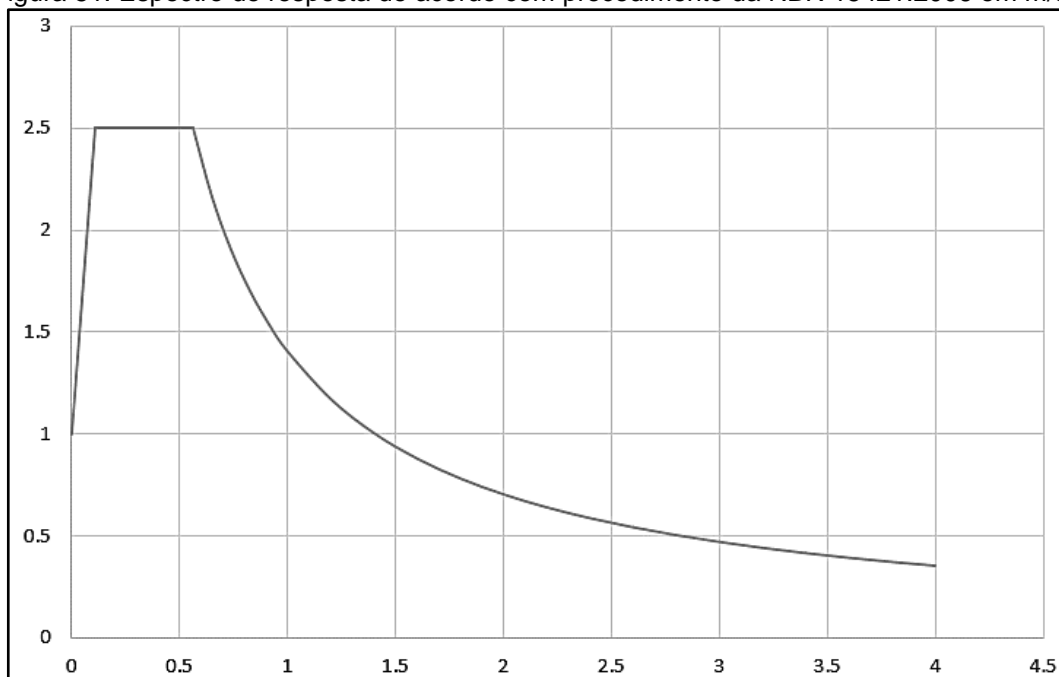
Além do espectro de resposta é importante definir ainda dois parâmetros no TQS (Figura 53). O primeiro, a taxa de amortecimento que foi definida com o valor de 0,05, pois o espectro de resposta da norma brasileira é “correspondente à resposta elástica de um sistema de um grau de liberdade com uma fração de amortecimento crítico de 5%” (NBR 15421:2006, p. 9). O segundo, a escolha do método de

---

<sup>18</sup> Para mais informações sobre esse ângulo consultar MEDEIROS (2010).

combinação de respostas modais em uma direção que, para a análise, foi adotado o CQC devido às vantagens já citadas anteriormente nesse mesmo capítulo.

Figura 51: Espectro de resposta de acordo com procedimento da NBR 15421:2006 em  $m/s^2$ .



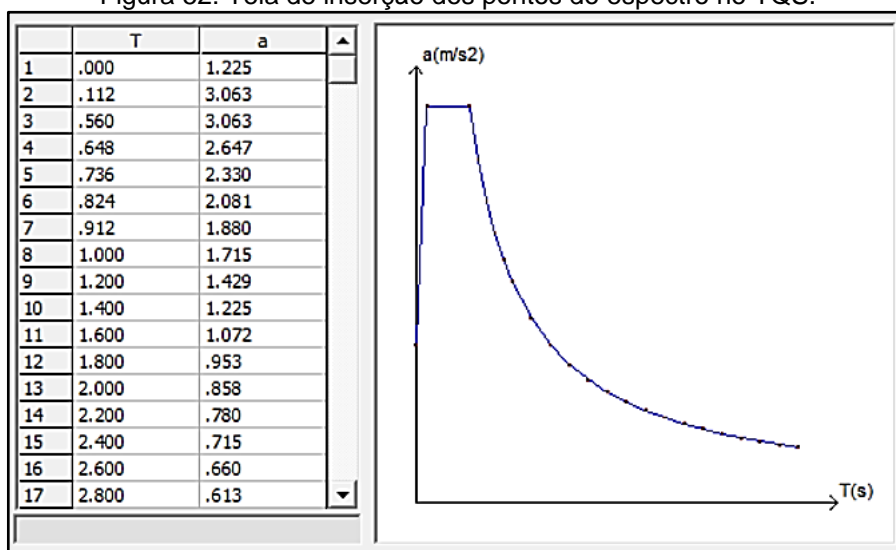
Fonte: Autor (2019)

Tabela 23: Pontos do espectro inseridos no TQS.

T(s)	a(m/s <sup>2</sup> )	
0.000	1.225	1º Trecho
0.112	3.063	
0.560	3.063	2º Trecho
0.648	2.647	3º Trecho
0.736	2.330	
0.824	2.081	
0.912	1.880	
1.000	1.715	
1.200	1.429	
1.400	1.225	
1.600	1.072	
1.800	0.953	
2.000	0.858	
2.200	0.780	
2.400	0.715	
2.600	0.660	
2.800	0.613	
3.000	0.572	
3.200	0.536	
3.400	0.504	
3.600	0.476	
3.800	0.451	
4.000	0.429	

Fonte: Autor (2019).

Figura 52: Tela de inserção dos pontos do espectro no TQS.



Fonte: Adaptado de TQS.

Figura 53: Tela do TQS para definição de taxa de amortecimento e método de combinação de respostas modais.

**Taxa de Amortecimento**

0,05

**Ângulo que define as Direções de Propagação**

0

**Método para Cálculo da Resposta Máxima numa Direção**

1 - (CQC) Combinação Quadrática Completa

**Método para Cálculo da Resultante das Respostas**

0 - (SRSS) Raiz Quadrada da Soma dos Quadrados

Fonte: TQS 21.3

Outra etapa importante é a definição da quantidade de modos de vibração que serão avaliados. A NBR 15421:2006, no item 10.1, sugere que o número de modos seja o bastante para considerar pelo menos 90% da massa total em cada uma das direções ortogonais. No TQS, a definição desse número pode ser feita na aba “Vibrações” das cargas do tipo adicionais. Também, nessa mesma aba, é necessário definir os ponderadores de cada caso de carga que serão usados para definir a massa da estrutura. O peso próprio e cargas permanentes, por estarem sempre estarem

presentes na estrutura, foram definidos com valor 1 e as demais sobrecargas com valor de 0,4 que é o valor do coeficiente de ponderação na combinação frequente que a NBR 6118:2014 sugere para análise de vibrações.

Figura 54: Definição de modos e massa da estrutura no TQS.

Modos de vibração para pórtico e grelha	
Grelhas de lajes e pórticos de vigas e pilares	10
Pórticos com pilares, vigas e lajes	10
Casos que definem a massa da estrutura	
	Ponderador
Peso próprio	1
Cargas permanentes	1
Sobrecargas	0.4

Fonte: Adaptado de TQS

Na análise de estruturas submetidas a sismos, o item 10.2 da NBR 15421:2006 (p. 23) afirma que “todas as respostas obtidas em termos de forças, momentos e reações de apoio devem ser multiplicadas pelo fator  $I/R$ ”. Esse fator é multiplicado aos valores dos esforços internos para, então, usá-los no dimensionamento da estrutura analisada. Diante disso, em ambos os modelos avaliados o fator  $I/R$  assume o valor de 0,33.

#### 7.4.2 Estrutura modelo I

Para esta estrutura, a análise dos seus cinco principais modos de vibração foi suficiente para garantir o requisito da norma brasileira (ver Tabela 24 e Tabela 25 – participação modal acumulada). Isto foi avaliado pelo total acumulado da taxa de participação modal. Segundo Medeiros (2010), essa taxa indica a importância de cada modo de vibração para o cálculo da resposta da estrutura e é obtido pela razão do quadrado do fator de participação modal pela massa total que atua nos graus de liberdade não restringidos. De acordo com a Tabela 24 e com Tabela 25, 92,91% da massa foi considerada na direção x e 92,52% na direção y.

A Tabela 24 e Tabela 25 resumem os parâmetros modais obtidos do TQS para cada um dos principais modos de vibração da estrutura em cada uma das direções horizontais da estrutura:

Tabela 24: Parâmetros modais na direção X.

Nº	Período(s)	Frequência (Hz)	Direção X		
			Fator de Participação Modal	Participação da Massa	
				Por modo	Acumulado
1	1,399	0,715	0,001	0,00%	0,00%
2	1,289	0,776	7,499	81,00%	81,00%
3	1,150	0,870	-0,056	0,00%	81,01%
4	0,415	2,410	0,000	0,00%	81,01%
5	0,390	2,564	2,875	11,91%	92,91%

Fonte: Autor (2019)

Tabela 25: Parâmetros modais na direção Y.

Nº	Período(s)	Frequência (Hz)	Direção Y		
			Fator de Participação Modal	Participação da Massa	
				Por modo	Acumulado
1	1,399	0,715	7,459	80,15%	80,15%
2	1,289	0,776	-0,001	0,00%	80,15%
3	1,150	0,870	-0,044	0,00%	80,15%
4	0,415	2,410	2,93	12,37%	92,52%
5	0,390	2,564	0,000	0,00%	92,52%

Fonte: Autor (2019)

As acelerações foram tomadas com o período de cada modo a partir do espectro de respostas obtido e introduzidas no TQS conforme exposto no item 7.4.1.

Para análise dos esforços foram escolhidos 3 pilares (P1, P2 e P6) e 6 vãos de vigas (1º e 2º da V1; 1º e 2º da V2; 2º da V4; 2º da V5). Os demais elementos, por simetria têm os mesmos valores. Também, analisaram-se apenas os esforços do pavimento térreo, pois são os maiores valores.

Os valores absolutos dos esforços internos máximos devidos à ação do sismo e do vento a 0º e a 90º são localizados na base dos pilares analisados e estão apresentados na Tabela 26.

Os valores absolutos dos esforços internos máximos devidos à ação do sismo e do vento a 0º e a 90º nos vãos das vigas escolhidas são mostrados na Tabela 27.

Observa-se que os esforços gerados pelos sismos no modelo I são muito maiores que os devidos ao vento, pois este é uma estrutura baixa e, por isso, o vento exerce pouca influência sobre a edificação resultando em esforços mais baixos.

Tabela 26: Comparação de esforços internos devidos ao sismo e ao vento a 0° e a 90° nos pilares da estrutura modelo I.

Estrutura modelo I						
Elemento	Ação	Fx (tf)	Fy (tf)	Fz (tf)	My (tfm)	Mz (tfm)
P1	Sismo 0°	10,37	2,19	0,07	0,20	4,57
	Sismo 90°	10,53	0,06	9,15	24,32	0,07
	Vento 0°	0,44	0,13	0,00	0,00	0,26
	Vento 90°	0,87	0,00	1,05	2,64	0,01
P2	Sismo 0°	8,16	0,02	11,71	26,41	0,03
	Sismo 90°	12,01	2,24	0,12	0,20	4,69
	Vento 0°	0,34	0,00	0,69	1,48	0,00
	Vento 90°	0,99	0,25	0,01	0,01	0,51
P6	Sismo 0°	14,65	2,26	0,03	0,07	4,63
	Sismo 90°	0,00	0,00	11,51	26,61	0,00
	Vento 0°	0,62	0,13	0,00	0,00	0,26
	Vento 90°	0,00	0,00	1,30	2,88	0,00

Fonte: Valores extraídos do TQS 21.3

Tabela 27: Comparação de esforços internos devidos à ação de sismo e vento a 0° e a 90° em vãos de vigas da estrutura modelo I.

Estrutura modelo I						
Elemento	Ação	Fx (tf)	Fy (tf)	Fz (tf)	My (tfm)	Mz (tfm)
1º Vão da V1	Sismo 0°	0,32	0,05	3,01	9,80	1,09
	Sismo 90°	0,08	1,68	0,11	0,40	6,90
	Vento 0°	0,07	0,00	0,15	0,50	0,12
	Vento 90°	0,01	0,34	0,01	0,04	1,32
2º Vão da V1	Sismo 0°	0,01	0,05	5,61	13,84	0,13
	Sismo 90°	0,15	0,01	0,03	0,12	6,01
	Vento 0°	0,00	0,00	0,29	0,71	0,01
	Vento 90°	0,02	0,00	0,00	0,00	1,10
1º Vão da V2	Sismo 0°	0,37	0,00	4,38	14,58	0,01
	Sismo 90°	0,00	0,32	0,00	0,00	2,05
	Vento 0°	0,07	0,00	0,23	0,75	0,00
	Vento 90°	0,00	0,18	0,00	0,00	0,61
2º Vão da V2	Sismo 0°	0,01	0,01	0,43	1,09	0,02
	Sismo 90°	0,00	0,02	0,00	0,00	2,43
	Vento 0°	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00
	Vento 90°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
2º Vão da V4	Sismo 0°	0,04	0,79	0,24	0,64	2,96
	Sismo 90°	0,65	0,13	3,28	12,45	1,49
	Vento 0°	0,00	0,08	0,01	0,03	0,29
	Vento 90°	0,12	0,02	0,32	1,23	0,38
2º Vão da V5	Sismo 0°	0,02	1,07	0,03	0,13	4,18
	Sismo 90°	0,53	0,12	3,55	12,00	1,06
	Vento 0°	0,00	0,11	0,00	0,00	0,42
	Vento 90°	0,08	0,02	0,35	1,19	0,25

Fonte: Valores extraídos do TQS 21.3

### 7.4.3 Estrutura modelo II

Na estrutura modelo II foi necessária a análise de oito modos de vibração para garantir que 90% da massa estivesse considerada no cálculo. De acordo com a Tabela 28 e Tabela 29, 92,22% da massa foi mobilizada na direção x e 91,84% na direção y.

Os valores absolutos dos esforços internos máximos devidos à ação do sismo e do vento a 90° e a 0° são localizados na base dos pilares analisados e estão apresentados na Tabela 30.

Já para as vigas escolhidas, os valores absolutos dos esforços internos máximos devidos à ação do sismo e do vento a 0° e a 90° em seus vãos são mostrados na Tabela 31.

Tabela 28: Parâmetros modais na direção X.

N	Período(s)	Frequência (Hz)	Direção X		
			Fator de Participação Modal	Participação da Massa	
				Por modo	Acumulado
1	3,679	0,272	0,001	0,00%	0,00%
2	3,232	0,309	12,835	77,79%	77,79%
3	2,911	0,343	-0,118	0,01%	77,80%
4	1,143	0,875	0,000	0,00%	77,80%
5	1,017	0,983	4,661	10,26%	88,06%
6	0,908	1,101	-0,040	0,00%	88,06%
7	0,607	1,647	0,000	0,00%	88,06%
8	0,550	1,818	-2,967	4,16%	92,22%

Fonte: Autor (2019)

Tabela 29: Parâmetros modais na direção Y.

N	Período(s)	Frequência (Hz)	Direção Y		
			Fator de Participação Modal	Participação da Massa	
				Por modo	Acumulado
1	3,679	0,272	12,780	77,12%	77,12%
2	3,232	0,309	0,000	0,00%	77,12%
3	2,911	0,343	-0,060	0,00%	77,12%
4	1,143	0,875	4,690	10,37%	87,49%
5	1,017	0,983	0,000	0,00%	87,49%
6	0,908	1,101	-0,020	0,00%	87,49%
7	0,607	1,647	3,040	4,35%	91,84%
8	0,550	1,818	0,000	0,00%	91,84%

Fonte: Autor (2019)

Tabela 30: Comparação de esforços internos devidos ao sismo e ao vento a 0° e a 90° nos pilares da estrutura modelo II.

Estrutura modelo II						
Elemento	Ação	Fx (tf)	Fy (tf)	Fz (tf)	My (tfm)	Mz (tfm)
P1	Sismo 0°	39,88	1,62	0,10	0,49	4,02
	Sismo 90°	35,44	0,07	12,08	51,28	0,08
	Vento 0°	7,30	0,33	0,00	0,02	0,82
	Vento 90°	12,85	0,00	4,97	20,71	0,05
P2	Sismo 0°	35,19	0,04	15,75	53,15	0,04
	Sismo 90°	45,55	1,65	0,17	0,34	4,14
	Vento 0°	6,50	0,00	3,27	10,87	0,00
	Vento 90°	16,58	0,67	0,00	0,09	1,68
P6	Sismo 0°	38,31	1,63	0,05	0,17	4,03
	Sismo 90°	0,01	0,00	14,66	53,60	0,00
	Vento 0°	7,20	0,34	0,00	0,00	0,83
	Vento 90°	0,00	0,00	6,04	21,73	0,00

Fonte: Valores extraídos do TQS 21.3

Tabela 31: Comparação de esforços internos devidos à ação de sismo e vento a 0° e a 90° em vãos de vigas da estrutura modelo II.

Estrutura modelo II						
Elemento	Ação	Fx (tf)	Fy (tf)	Fz (tf)	My (tfm)	Mz (tfm)
1º Vão da V1	Sismo 0°	0,49	0,11	3,00	9,96	0,71
	Sismo 90°	0,09	1,59	0,20	0,68	6,41
	Vento 0°	0,00	0,02	0,61	2,01	0,32
	Vento 90°	0,04	0,88	0,07	0,26	3,42
2º Vão da V1	Sismo 0°	0,00	0,07	6,67	15,47	0,15
	Sismo 90°	0,13	0,01	0,03	0,10	5,64
	Vento 0°	0,00	0,01	1,34	3,12	0,02
	Vento 90°	0,06	0,00	0,00	0,01	2,99
1º Vão da V2	Sismo 0°	0,57	0,00	4,25	13,35	0,02
	Sismo 90°	0,00	0,34	0,00	0,00	2,72
	Vento 0°	0,02	0,00	0,86	2,70	0,00
	Vento 90°	0,00	0,11	0,00	0,00	1,07
2º Vão da V2	Sismo 0°	0,00	0,00	0,54	1,40	0,01
	Sismo 90°	0,00	0,01	0,00	0,00	2,75
	Vento 0°	0,00	0,00	0,11	0,28	0,00
	Vento 90°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93
2º Vão da V4	Sismo 0°	0,04	1,15	0,47	1,10	4,48
	Sismo 90°	0,73	0,18	3,08	11,07	1,24
	Vento 0°	0,00	0,30	0,10	0,23	1,12
	Vento 90°	0,36	0,08	1,23	4,41	0,79
2º Vão da V5	Sismo 0°	0,01	0,36	0,08	0,27	1,32
	Sismo 90°	0,62	0,23	3,58	12,29	1,19
	Vento 0°	0,00	0,13	0,01	0,05	0,43
	Vento 90°	0,28	0,09	1,43	4,91	0,65

Fonte: Valores extraídos do TQS 21.3



Observa-se que os esforços gerados pelos sismos no modelo II ainda são maiores que os esforços devidos ao vento, porém o vento passa a ter maior influência no modelo II se comparado em relação ao modelo I. Além disso, na primeira estrutura poderia ter sido considerada a ação de desaprumo global, que provavelmente seria superior ao vento, mas foi propositalmente desconsiderada.

#### 7.4.4 Análises entre modelos

Confrontando as diferenças percentuais médias obtidas dos esforços de sismos entre as duas estruturas com as diferenças percentuais médias dos esforços de vento, pode-se notar que o vento tem uma maior variação relativa do modelo I para o modelo II do que o sismo (Tabela 32 – resultados do modelo II em relação ao modelo I). Se essa tendência continuar a ocorrer, poder-se-ia concluir que, na medida em que há o aumento da altura, o vento passa a ser uma ação mais relevante do que a do sismo.

Entretanto, deve-se reconhecer que as análises feitas nesse trabalho foram poucas para se chegar a essa afirmação, pois a comparação direta entre sismo e vento não é algo que deve ser feito. Além disso, outros fatores que influenciam nos esforços devidos ao sismo, não foram levados em consideração, tais como a mudança da geometria da estrutura, por exemplo. Também o principal objetivo desse capítulo foi apenas testar o módulo de análise espectral do TQS.

Tabela 32: Valores médios das diferenças percentuais obtidas entre os modelos I e II (modelo II como referência).

Elemento	Ação	Fx	Fy	Fz	My	Mz
Pilares	Sismo 0º	70,86%	41,28%	31,88%	56,11%	17,86%
	Sismo 90º	71,96%	25,02%	25,05%	48,04%	12,89%
	Vento 0º	93,38%	61,19%	78,90%	83,04%	49,52%
	Vento 90º	93,63%	62,69%	78,68%	83,53%	69,76%
Vigas	Sismo 0º	45,48%	47,36%	27,10%	26,24%	40,54%
	Sismo 90º	12,48%	59,14%	38,00%	31,37%	14,13%
	Vento 0º	250,00%	72,18%	83,14%	81,21%	47,77%
	Vento 90º	69,94%	69,44%	78,41%	83,33%	56,87%

Fonte: Autor (2019)

#### 7.4.5 Análises complementares

Além das análises realizadas anteriormente, foram feitas outras com diferentes espectros. Um deles foi o espectro conforme a metodologia da NBR 15421:2006, usando aceleração de pico de 0,11g que foi o valor obtido no mapa de perigo sísmico

para o RN da Figura 43 (resultados na Tabela 33 e Tabela 34). Outra foi a adoção do espectro médio dos quatro espectros gerados no capítulo 4, apresentado na linha cor de vinho da Figura 35 (resultados na Tabela 35 e Tabela 36). Ambos foram aplicados apenas à estrutura modelo II e observou-se os esforços dos pilares P1 e P2 (Tabela 33 e Tabela 35) e das vigas V1 (1º e 2º vão) e V4 (2º vão) (Tabela 34 e Tabela 36). É importante ressaltar que foram analisados somente os esforços resultantes da combinação (calculada através do método SRSS) dos sismos em todas as direções horizontais. Além disso, são mostrados os valores dos esforços multiplicados pelo fator  $I/R = 0,33$ , conforme comentado no item 7.4.1.

Tabela 33: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nos pilares P1 e P2 com espectro calculado segundo metodologia da NBR 15421:2006.

Estrutura modelo II						
Elemento	Ação	Fx (tf)	Fy (tf)	Fz (tf)	My (tfm)	Mz (tfm)
P1	Sismo SRSS	116,72	3,53	26,44	112,23	8,79
	Sismo SRSS * I/R	38,52	1,16	8,73	37,04	2,90
P2	Sismo SRSS	125,95	3,60	34,37	116,08	9,07
	Sismo SRSS * I/R	41,56	1,19	11,34	38,31	2,99

Fonte: Autor (2019)

Tabela 34: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nas vigas V1 e V4 com espectro calculado segundo metodologia da NBR 15421:2006.

Estrutura modelo II						
Elemento	Ação	Fx (tf)	Fy (tf)	Fz (tf)	My (tfm)	Mz (tfm)
1º Vão da V1	Sismo SRSS	1,09	3,50	6,57	21,81	14,12
	Sismo SRSS * I/R	0,36	1,16	2,17	7,20	4,66
2º Vão da V1	Sismo SRSS	0,28	0,15	14,57	33,80	12,36
	Sismo SRSS * I/R	0,09	0,05	4,81	11,15	4,08
2º Vão da V4	Sismo SRSS	1,60	2,54	6,82	24,34	9,82
	Sismo SRSS * I/R	0,53	0,84	2,25	8,03	3,24

Fonte: Autor (2019)

Tabela 35: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nos pilares P1 e P2 com espectro calculado pela PSHA para solo rochoso.

Estrutura modelo II						
Elemento	Ação	Fx (tf)	Fy (tf)	Fz (tf)	My (tfm)	Mz (tfm)
P1	Sismo SRSS	15,21	0,41	3,41	14,81	1,03
	Sismo SRSS * I/R	5,02	0,14	1,13	4,89	0,34
P2	Sismo SRSS	16,81	0,47	3,99	13,63	1,20
	Sismo SRSS * I/R	5,55	0,16	1,32	4,50	0,40

Fonte: Autor (2019)

Tabela 36: Valores absolutos dos esforços internos devidos à combinação do sismo nas duas direções horizontais nas vigas V1 e V4 com espectro calculado pela PSHA para solo rochoso.

<b>Estrutura modelo II</b>						
<b>Elemento</b>	<b>Ação</b>	<b>Fx (tf)</b>	<b>Fy (tf)</b>	<b>Fz (tf)</b>	<b>My (tfm)</b>	<b>Mz (tfm)</b>
<b>1º Vão da V1</b>	Sismo SRSS	0,13	0,45	0,78	2,58	1,82
	Sismo SRSS * I/R	0,04	0,15	0,26	0,85	0,60
<b>2º Vão da V1</b>	Sismo SRSS	0,04	0,02	1,72	3,99	1,59
	Sismo SRSS * I/R	0,01	0,01	0,57	1,32	0,52
<b>2º Vão da V4</b>	Sismo SRSS	0,21	0,30	0,91	3,24	1,16
	Sismo SRSS * I/R	0,07	0,10	0,30	1,07	0,38

Fonte: Autor (2019)

## 8. CONCLUSÃO

Tendo em vista a necessária revisão da NBR 15421:2006, um dos pontos deste documento técnico que tem sido criticado por especialistas e mostra-se com necessidade de atualização é o mapa de perigo sísmico (ou mapa de acelerações características). Diante disso, esta monografia teve como principal objetivo estudar a teoria e os conceitos da principal metodologia usada para construção destes mapas que é a PSHA.

A partir disso, o trabalho iniciou fazendo uma exposição dos conceitos fundamentais que dá subsídios ao leitor para o exposto na continuidade do trabalho. Dessa forma abordaram-se em linhas gerais os aspectos geológicos/geofísicos pertinentes aos abalos sísmicos. Também foram mostradas as noções gerais de conceitos presentes na engenharia sísmica: perigo, exposição, vulnerabilidade e risco sísmicos.

Discutiram-se também as diversas etapas da análise probabilística de perigo sísmico com foco, principalmente, nas duas mais importantes. A primeira, consistindo na caracterização de sismicidade por meio da definição da lei de recorrência das fontes, e a segunda como sendo a definição e aplicação de uma GMPE que descreva adequadamente as vibrações do solo provocadas por cada fonte. Nesse contexto, observa-se como é importante a seleção/construção adequada das equações de recorrência e movimento do solo. Caso haja negligência em uma dessas duas etapas a análise pode resultar em respostas equivocadas com valores de acelerações (ou outro parâmetro) não condizentes com a realidade da região. A consequência disso será ou a superestimativa ou a subestimativa da ação sísmica considerada na análise estrutural, pois este é o primeiro parâmetro definido em um projeto de estruturas submetidas a esse tipo de solicitação.

Posteriormente, desenvolveu-se uma das aplicações da PSHA que se constitui na construção de espectros de resposta sísmicos que é, na realidade, uma metodologia diferente da tradicional. Para isso, foram realizados dois procedimentos distintos: um mais “manual” onde podia-se observar cada etapa do PSHA, e outro, automatizado com o uso do *software* R-CRISIS 18.4.2. Os resultados obtidos por cada procedimento mostraram-se com diferenças consideráveis para a lei de recorrência de Dourado (2014).

Com os conceitos da PSHA expostos e aplicados foram apresentadas algumas das diversas propostas de mapas de perigo sísmico para o Brasil feitas por especialistas na área. Observa-se entre elas divergências dos valores de aceleração que elas apresentam. Entretanto, as propostas mais novas de Assumpção et al. (2016) e Petersen et al. (2018b) reafirmam a necessidade de revisão do mapa de acelerações características da NBR 15421:2006, tendo em vista que este último subestima a sismicidade em algumas regiões do país.

Além disso, foram feitas duas propostas de mapas de perigo sísmico para o Rio Grande do Norte utilizando o R-CRISIS, diferindo entre elas apenas a GMPE utilizada: em uma adotou-se o modelo de Toro, Abrahamson e Schneider (1997) e na outra, um modelo híbrido semelhante ao que Petersen et al (2018a) usou em regiões estáveis. Mesmo assim, não houve grandes diferenças entre os valores de aceleração dos mapas.

Por último, para aplicar os conceitos expostos foi realizada a análise sísmica espectral de duas estruturas modelo. Notou-se que, em ambas, as ações devidas ao sismo foram maiores que as devidas aos casos de vento e, diante disso, conclui-se afirmando a importância da consideração da ação sísmica para as estruturas mesmo diante da confortável situação do Brasil devido a sua baixa sismicidade.

#### **Sugestões para trabalhos futuros:**

- Estudos para elaboração de GMPEs específicas para cada fonte sísmica presente no Brasil com dados históricos de sismos nacionais disponíveis nas diversas estações sismográficas, tendo em vista a melhor descrição do comportamento sísmico de cada região do país;
- Definição de leis de recorrência adequadas para cada fonte sísmica do Brasil;
- Estudo mais detalhado em cada região sísmica do Brasil para construção de mapas de perigo sísmico levando-se em consideração as especificidades de cada uma delas;
- Estudo de ações sísmicas em modelos de estruturas com diferentes alturas, formas, rigidezes e massas, permitindo-se obter conclusões com respeito às influências dessas variáveis nas respostas das estruturas submetidas a esse tipo de solicitação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Andréia Abreu Diniz de. **Análise Probabilística de Segurança Sísmica de Sistemas e Componentes Estruturais**. 2002. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

AMMON, Charles J. **Faults and Faulting**. S. I. Disponível em: <<http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon/HTML/Classes/IntroQuakes/Notes/faults.html>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 26 p.

ASSUMPÇÃO, Marcelo; PIRCHINER, Marlon; DOURADO, João Carlos; BARROS, Lucas Vieira. Terremotos no Brasil: Preparando-se para Eventos Raros. **Boletim SBGf**. Rio de Janeiro, p. 25-29. mar. 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: 10 dez. 2018.

ASSUMPÇÃO, Marcelo; FERREIRA, Joaquim; BARROS, Lucas; BEZERRA, Francisco H. R.; FRANÇA, George Sand; BARBOSA, José Roberto; MENEZES, Eduardo; RIBOTTA, Luís Carlos; PIRCHINER, Marlon; NASCIMENTO, Aderson do; DOURADO, João Carlos. Intraplate seismicity in Brazil. In: ASSUMPÇÃO, Marcelo; BARROS, Lucas; BEZERRA, Francisco H. R.; FRANÇA, George Sand. **Intraplate seismicity**. [S. I.]: Cambridge University Press, 2014. Cap. 3. p. 50-71. DOI: 10.1017/CBO9781139628921.004 Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/266393548\\_Intraplate\\_seismicity\\_in\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/266393548_Intraplate_seismicity_in_Brazil)>. Acesso em: 04 mai. 2019.

BAKER, Jack W. (2013). **Probabilistic Seismic Hazard Analysis**. White Paper Version 2.0.1, 79 pp. 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)>.

BEZERRA, Francisco Hilario; FERREIRA, Joaquim Mendes; NASCIMENTO, Aderson Farias do. Neotectônica e sismicidade no Brasil. **Boletim Sbgf**, [S. I.], v. 1, n. 96, p.22-24, abr. 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: 04 mai. 2019.

BOMMER, Julian J.; DOUGLAS, John; SCHERBAUM, Frank; COTTON, Fabrice; BUNGUM, Hilmar; FÄH, Donat. On the Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis. **Seismological Research Letters**, [S. l.], v. 81, n. 5, p.783-793, 31 ago. 2010. Seismological Society of America (SSA). DOI: 10.1785/gssrl.81.5.783

BRASIL, Reyolando M. L. R. F.; SILVA, Marcelo Araujo da. **Introdução à Dinâmica das Estruturas**. São Paulo: Blucher, 2015.

BUDNITZ, R. J.; APOSTOLAKIS, G.; COPPERSMITH, K.; MORRIS, Peter A. **Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use for Experts**. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1997. 185 p. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/docs/ML0800/ML080090003.pdf>>.

BRITO, Ronnie Chtcot. **Acelerogramas artificiais de sismos aplicados a edificações**. 2017. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo., São Paulo, 2017.

CALVI, G. M. R. Pinho; MAGENES, G.; BOMMER, J.J.; RESTREPO-VÉLEZ, L. F.; CROWLEY, H. Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies Over the Past 30 Years. **Journal of Earthquake Technology**. [S. l.], p. 75-104. set. 2006.

CHOPRA, Anil K. **Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**. 4. ed. Califórnia: Pearson Prentice Hall, 2012.

DANTAS, Renato Ramos da Silva. **Decaimento da Aceleração de Ondas Sísmicas dos Terremotos na Borda da Bacia Potiguar**. 2012. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

DIMATÉ, Cristina; DRAKE, L.; YEPEZ, H.; OCOLA, L.; RENDON, H.; GRÜNTAL, G.; GIARDINI, D. Seismic hazard assesment in the Northern Andes (PILOT Project). **Annali di Geofisica**, [S. l.], v. 42, n. 6, p.1039-1055, dez. 1999. Disponível em: <<https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3787/3851>>.

DOURADO, J. C. Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil. Em **Congresso Brasileiro de Geologia**. 2014. Disponível em: <<http://www.47cbg.com.br/apresentacoes/PAP015043.pdf>>.

GIOVINAZZI, Sonia. **The Vulnerability Assessment and the Damage Scenario in Seismic Risk Analysis**. 2005. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil Engineering, Technical University Carolo-wilhelmina At Braunschweig, Lanciano, 2005.

GUADALUPE, Ulises Bobadilla. **Análise Dinâmica Modal Espectral de Pórticos Planos**. 1996. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 1996.

LANG, Kerstin. **Seismic Vulnerability of Existing Buildings**. Zürich: Vdf Hochschulverlag Ag An Der Eth Zürich, 2002.

LOAYZA, Fanny Herrera. **Modelagem do Comportamento Pós-Sismo de uma Barragem de Rejeito**. 2009. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Cap. 2.

MATTOS, Bruna V. Sismicidade do Brasil. **Boletim SBGf**. Rio de Janeiro, p. 8-9. mar. 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: 10 dez. 2018.

MCGUIRE, Robin K. **Seismic Hazard and Risk Analysis**. Boulder: Earthquake Engineering Research Institute, 2004. 221 p.

MEDEIROS, Sérgio Pinheiro. **Módulo de Análise Sísmica do Sistema TQS**. 2010. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/89-artigos/253-modulo-de-analise-sismica-do-sistema-tqs>>. Acesso em: 17 mar. 2019.

MELÉNDEZ, Armando Aguilar et al. Development and Validation of Software CRISIS to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment with Emphasis on the Recent CRISIS2015. **Computación y Sistemas**, [s.l.], v. 21, n. 1, p.67-90, 31 mar. 2017. Instituto Politecnico Nacional/Centro de Investigacion en Computacion. <http://dx.doi.org/10.13053/cys-21-1-2578>.



MIRANDA, Paulo de Souza Tavares. **Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica na Realidade Predial Brasileira**. 2010. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

MIRANDA, Paulo S. T.; VARUM, Humberto S. A.; POUÇA, Nelson S. Vila. Reflexões sobre o risco sísmico no Brasil. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA SÍSMICA**, 11., 2019, Lisboa. Artigo. [S. l.]: [S. l.], 2019. p. 1 - 12.

NÓBREGA, Petrus G. B. da; NÓBREGA, Selma H. S. da. Perigo sísmico no brasil e a responsabilidade da engenharia de estruturas. **HOLOS**, Natal, v. 4, n. 32, p.162-175, jul. 2018. DOI: 10.15628/holos.2016.4703. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4703>>. Acesso em: 16 set. 2018.

ORDAZ, Mario; SALGADO-GÁLVEZ, Mario. **R-CRISIS Validation and Verification Document**. Cidade do México: Instituto de Engenharia, 2019.

PETERSEN, Mark D.; HARMSEN, Stephen C.; JAISWAL, Kishor S.; RUKSTALES, Kenneth S.; LUCO, Nicolas; HALLER, Kathleen M.; MUELLER, Charles S.; SHUMWAY, Allison M. Seismic Hazard, Risk, and Design for South America. **Bulletin of the Seismological Society of America**, [S.l.], v. 108, n. 2, p.781-800, jan. 2018a. DOI: 10.1785/0120170002.

PETERSEN, Mark D.; HARMSEN, Stephen C.; JAISWAL, Kishor S.; RUKSTALES, Kenneth S.; LUCO, Nicolas; HALLER, Kathleen M.; MUELLER, Charles S.; SHUMWAY, Allison M. **Seismic Hazard, Risk, and Design for South America**: U.S. Geological Survey data release, 2018b. DOI: 10.5066/F7Wm1BK1.

PIRCHINER, Marlon. **Técnicas de suavização aplicadas à caracterização de fontes sísmicas e à análise probabilística de ameaça sísmica**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Informação, Escola de Matemática Aplicada, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2014.

QUEIROZ, Daniel Évora de. **Perigo e Risco Sísmico no Nordeste Brasileiro**. 2017. Curso de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Qualificação de Doutorado.

SAADI, Allaoua; MACHETTE, Michael N.; HALLER, Kathleen M.; DART, Richard L.; BRADLEY, Lee-Ann. **Map and Database of Quaternary Faults and Lineaments in Brazil**. Denver: USGS, 2002. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-230/OFR-02-230-508text.pdf>>

SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. Souza; SILVA, F. C. M. Risco Sísmico na Região Nordeste do Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 3, n. 3, p.374-389, set. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/riem/v3n3/08.pdf>>

SHEDLOCK, Kayne M.; TANNER, James G. Seismic hazard map of the western hemisphere. **Annali di Geofisica**, [S. l.], v. 42, n. 6, p.1199-1214, dez. 1999. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/50301179\\_Seismic\\_hazard\\_map\\_of\\_the\\_western\\_hemisphere](https://www.researchgate.net/publication/50301179_Seismic_hazard_map_of_the_western_hemisphere)>

SILVA, Fernanda Cristina Moreira da. **Avaliação do Risco Sísmico nas Regiões Nordeste e Sudeste do Brasil**. 2009. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, Walter; GREGOR, Nick; DARRAGH, Robert. **Development of Regional Hard Rock Attenuation Relations for Central and Eastern North America**. El Cerrito: Pacific Engineering and Analysis, 2002. Disponível em: <[http://www.pacificengineering.org/CEUS/Development%20of%20Regional%20Hard\\_ABC.pdf](http://www.pacificengineering.org/CEUS/Development%20of%20Regional%20Hard_ABC.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2019.

TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

TORRES, Helton H. Falcão. **Metodologia para Estudos Neotectônicos Regionais: o caso João Câmara**. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994.

TORO, Gabriel R.; ABRAHAMSON, Norman A.; SCHNEIDER, John F. Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties. **Seismological Research Letters**, [S. l.], v. 68, n. 1, p.41-57, jan. 1997.

VASCONCELOS, Afonso. Risco Sísmico no Brasil: e seu impacto sobre grandes obras. **Jornal do Instituto de Engenharia**. São Paulo, p. 7-7. abr. 2010. Disponível em: <<https://www.institutodeengenharia.org.br/site/wp-content/uploads/2018/02/arqjornalie40.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2018.

VROCHIDOU, E.; ALVANITOPOULOS P. F.; ANDREADIS, I.; ELENAS, A.; MALLOUSI, A. Synthesis of artificial spectrum-compatible seismic accelerograms. **Measurement Science and Technology**, [S.l.], v. 25, n. 8, p.1-14, jun. 2014. IOP Publishing. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/264351763\\_Synthesis\\_of\\_artificial\\_spectrum-compatible\\_seismic\\_accelerograms](https://www.researchgate.net/publication/264351763_Synthesis_of_artificial_spectrum-compatible_seismic_accelerograms)>

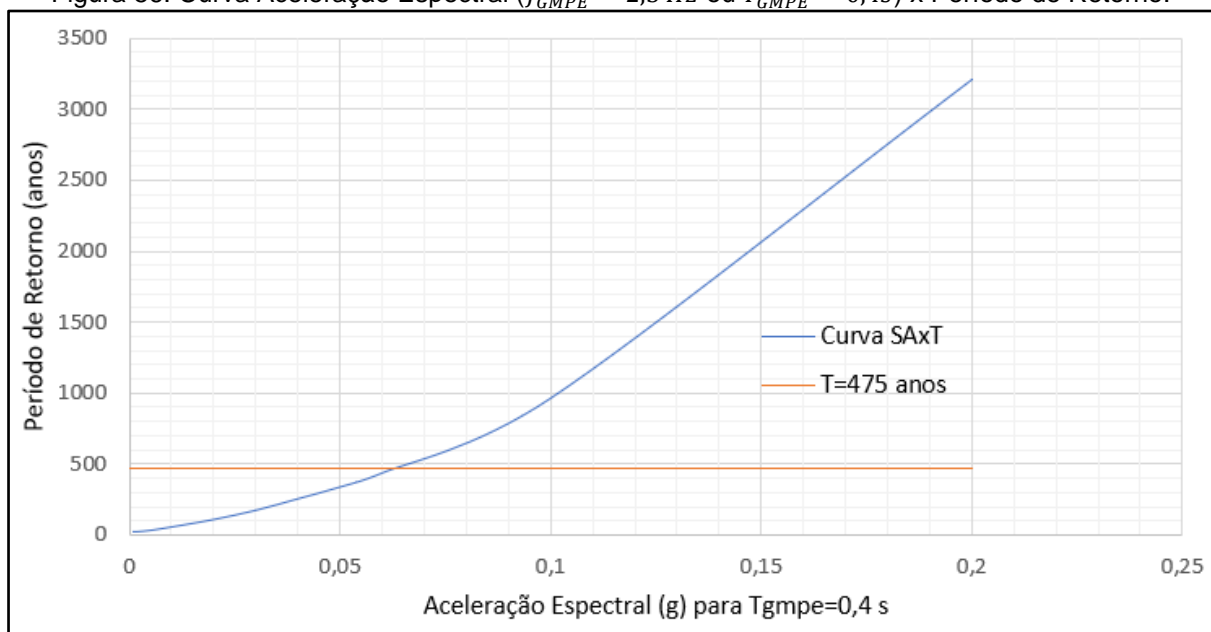
## APÊNDICE A – Curvas de aceleração espectral versus período de retorno

Figura 55: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 1 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 1 \text{ s}$ ) x Período de Retorno.



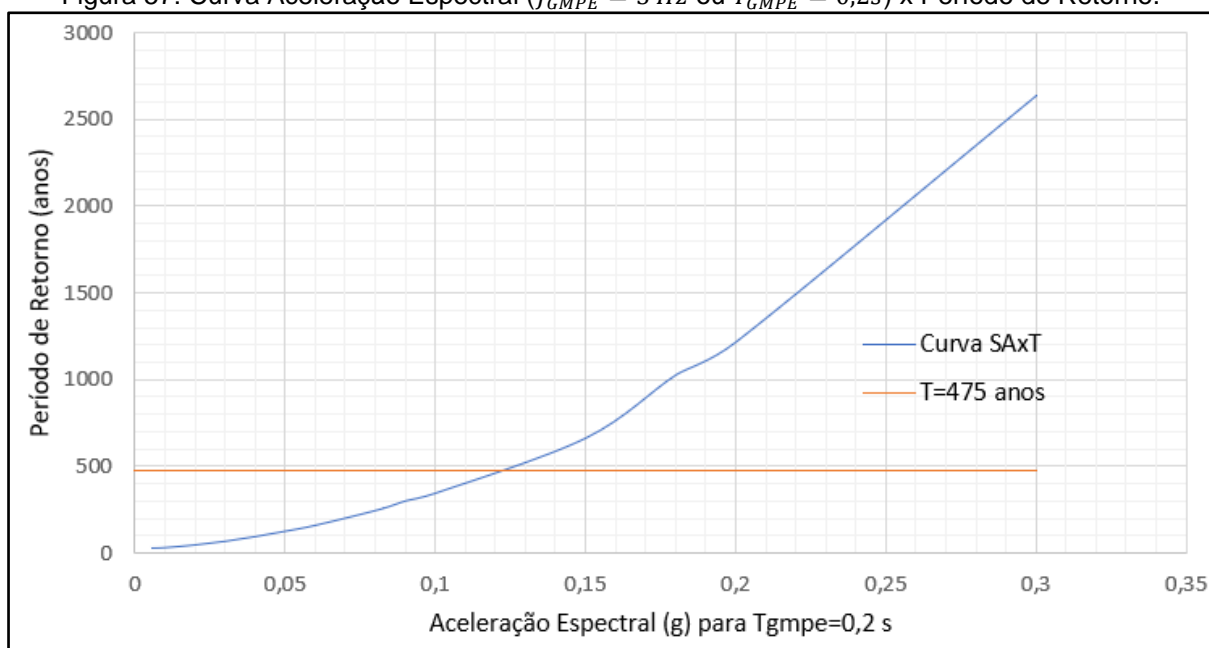
Fonte: Autor (2019)

Figura 56: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 2,5 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 0,4 \text{ s}$ ) x Período de Retorno.



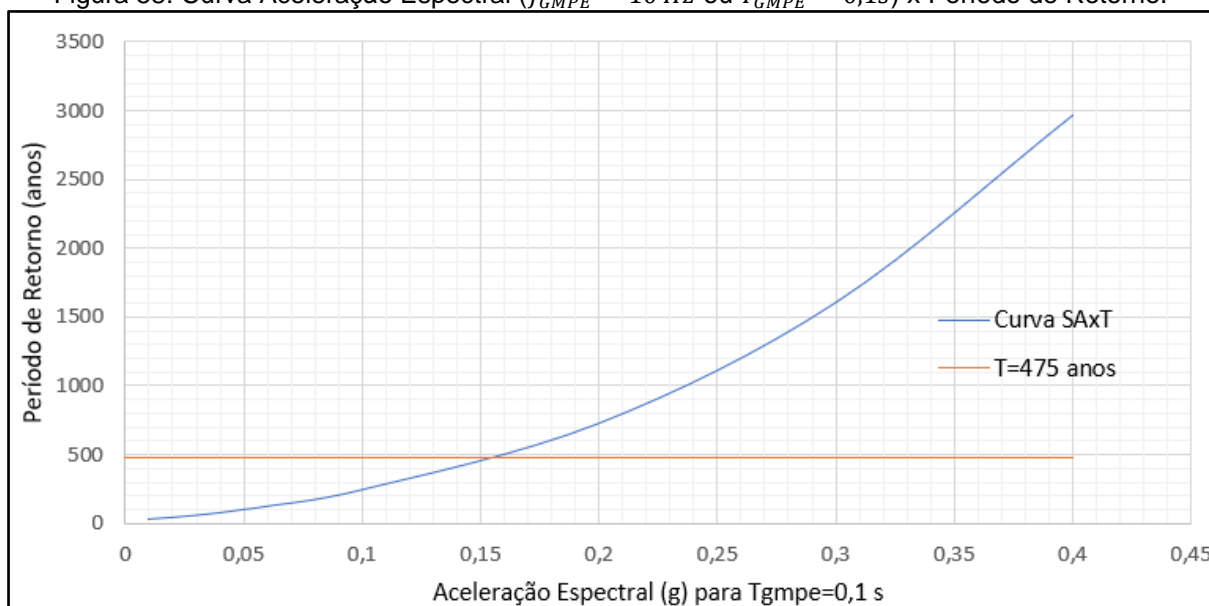
Fonte: Autor (2019)

Figura 57: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 5 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 0,2 \text{ s}$ ) x Período de Retorno.



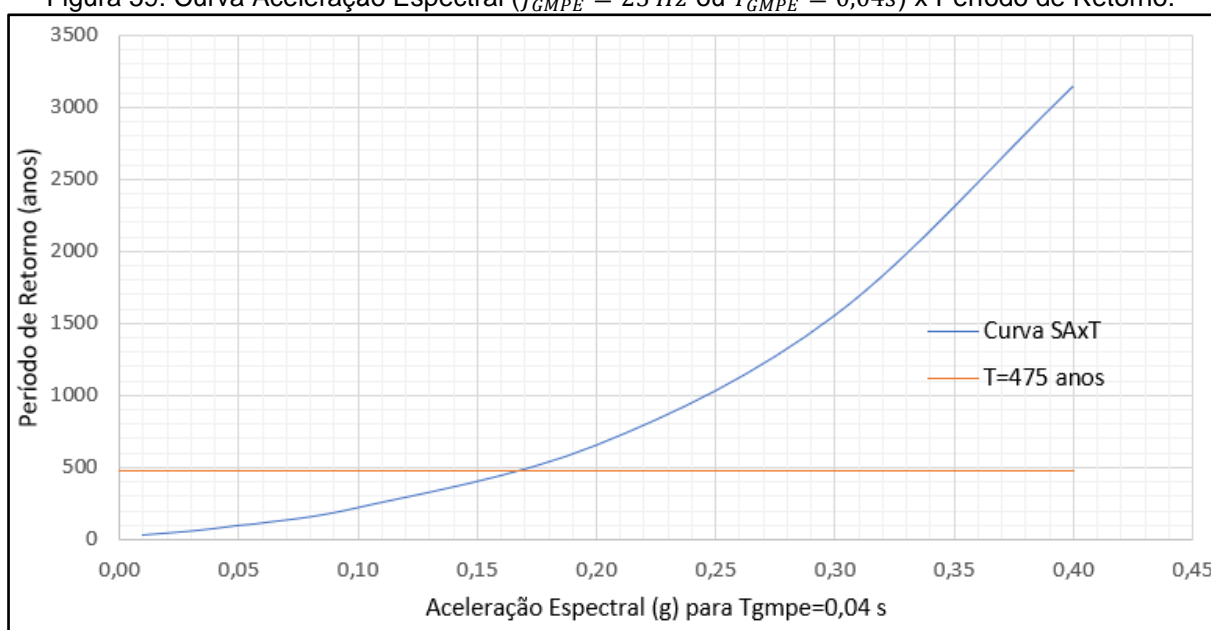
Fonte: Autor (2019)

Figura 58: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 10 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 0,1 \text{ s}$ ) x Período de Retorno.



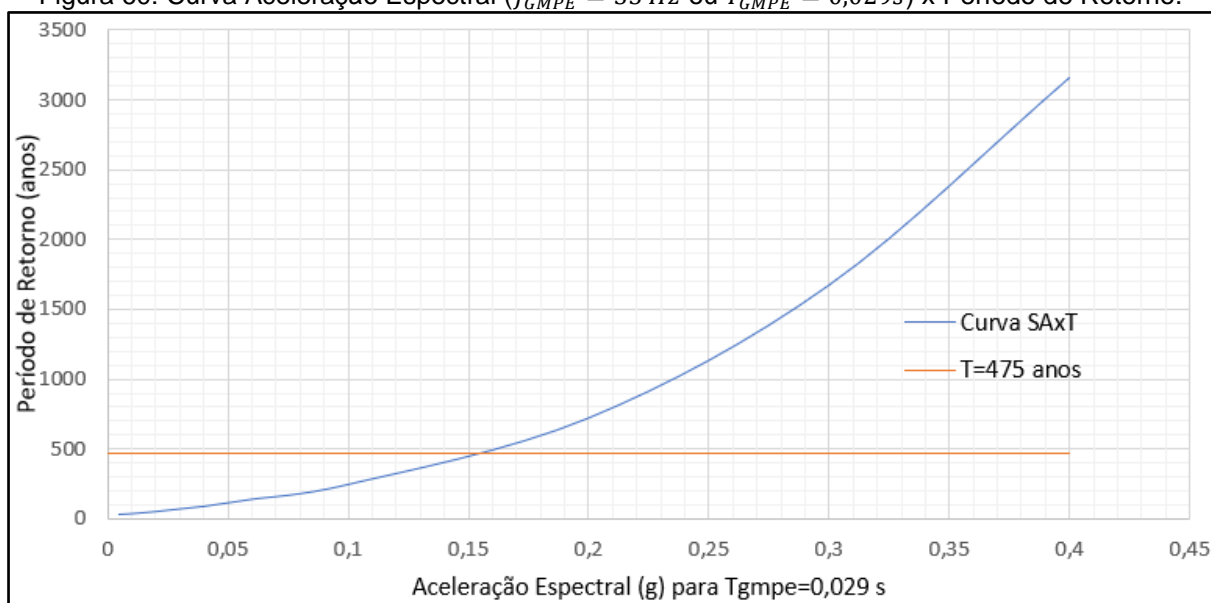
Fonte: Autor (2019)

Figura 59: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 25 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 0,04\text{s}$ ) x Período de Retorno.

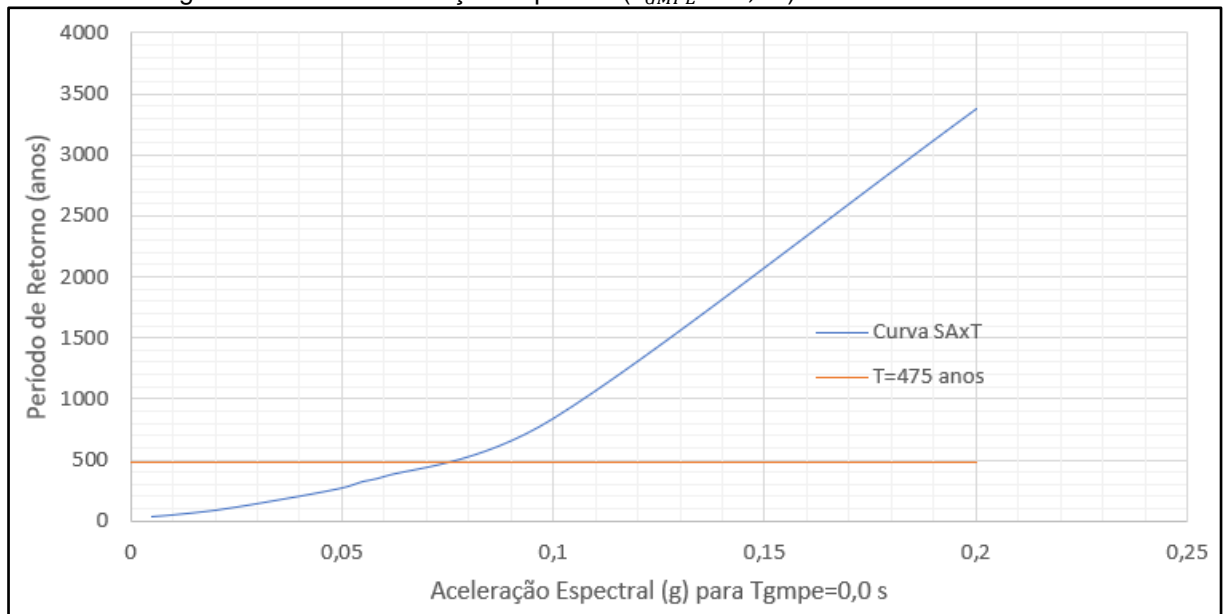


Fonte: Autor (2019)

Figura 60: Curva Aceleração Espectral ( $f_{GMPE} = 35 \text{ Hz}$  ou  $T_{GMPE} = 0,029\text{s}$ ) x Período de Retorno.



Fonte: Autor (2019)

Figura 61: Curva Aceleração Espectral ( $T_{GMPE} = 0,0 s$ ) x Período de Retorno.

Fonte: Autor (2019)