

Seismic Hazard for Brazilian Northeastern Region

Risco Sísmico na Região Nordeste do Brasil



S. H. C. SANTOS^a
sergiohampshire@gmail.com

S. SOUZA LIMA^b
sdesouzalima@gmail.com

F. C. M. SILVA^c
fernandinha.cms@gmail.com

Abstract

The Brazilian territory presents low seismicity, typical of a tectonic intra-plates region. Nevertheless, the seismic effects cannot be simply disregarded in the engineering projects. Therefore, a study is presented in this paper, of the seismicity of the Brazilian Northeastern Region, which due to its proximity with the South Atlantic Ridge, presents a seismic activity rate higher than of other Brazilian regions. In this way, the seismic occurrences and the probabilistic distribution functions of spectral accelerations are determined for the region. From the obtained values, the design response spectra are defined for the region, being its values compared, for several periods, with the design spectrum presented by the Brazilian Seismic Standard NBR 15421.

Keywords: seismic hazard, seismic engineering, hazard analysis.

Resumo

O território brasileiro apresenta baixa atividade sísmica, característica de região tectônica intra-placas. Entretanto, os efeitos dos sismos não podem ser simplesmente desconsiderados em projetos de engenharia. Assim, é apresentado neste trabalho um estudo da sismicidade da região Nordeste do Brasil, que por estar posicionada próxima à falha do Atlântico Central, a leva a apresentar uma taxa de atividade sísmica com continuidade de ocorrência mais alta do que a de outras regiões brasileiras. Dentro deste contexto, são calculadas as recorrências sísmicas e as distribuições probabilísticas de acelerações espectrais para a região. De posse desses valores, são determinados os espectros de resposta de projeto para a região, fazendo as devidas comparações entre os resultados obtidos para cada período de recorrência com o espectro apresentado pela Norma Brasileira de Sismos NBR 15421.

Palavras-chave: risco sísmico, engenharia sísmica, análise de risco.

^a Polytechnic School, Federal University of Rio de Janeiro, sergiohampshire@gmail.com, PO Box 60529, CEP 21945-970, Rio de Janeiro, Brazil.

^b Polytechnic School, Federal University of Rio de Janeiro, sdesouzalima@gmail.com, PO Box 60529, CEP 21945-970, Rio de Janeiro, Brazil.

^c Tecton Engineering, fernandinha.cms@gmail.com, Rua do Carmo 57, 8th floor, CEP 20011-020, Rio de Janeiro, Brazil.

1. Introdução

Os primeiros estudos científicos sobre a sismicidade no território brasileiro começaram por volta do ano de 1970, a partir do qual dados sismológicos começaram a ser coletados, mas estes estudos ainda não foram concluídos. Inicialmente, foram considerados no Brasil dados provenientes de resultados de estudos sismológicos realizados em outros países do mundo. Santos e Souza Lima [1], considerando a continuidade geográfica entre países vizinhos do Brasil, a partir de um estudo realizado por Falconi [2], que analisou normas de projeto sísmico de seis países sul-americanos, excluindo o Brasil, consolidaram um mapa de sismicidade do Brasil. Esses estudos serviram de base para a proposição da Norma Brasileira de Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos, a NBR 15421 [3]. Esta Norma considera que a maioria do território brasileiro apresenta baixa sismicidade, mas que em duas regiões brasileiras, parte do Nordeste e parte do Norte e do Centro-Oeste (Amazônia Ocidental), o potencial sísmico é não desprezível.

O presente trabalho tem por objetivo fazer uma análise detalhada da sismicidade da Região Nordeste brasileira e obter as acelerações horizontais características, de acordo com os períodos de recorrência dos eventos sísmicos, e os respectivos espectros de resposta de projeto para análise sísmica, a fim de compará-los com o espectro da NBR 15421. Os dados sísmicos disponíveis e os estudos já feitos para definição das funções de distribuição probabilística de magnitudes sísmicas serão utilizados. Este mesmo assunto foi já tratado de forma mais resumida por Santos e Souza Lima [4]. O trabalho resume parte do Projeto de Graduação da terceira autora, realizado na Escola Politécnica da UFRJ, sob a orientação dos dois primeiros autores.

2. Dados sísmicos no Brasil e América do Sul

Ainda não existe uma análise completa da sismicidade do território brasileiro. Há, porém, um estudo do risco sísmico numa escala global feito pelo instituto GFZ-Potsdam [5]. Esse estudo é considerado pelo U.S. Geological Survey [6] no seu mapa de sismicidade global, que é reproduzido na Figura 1 para a América do Sul.

Observa-se no mapa, que o território brasileiro apresenta uma sismicidade muito baixa, com acelerações horizontais características normalmente inferiores a $0,4\text{m/s}^2$. Vale ressaltar também que em algumas áreas do Brasil a sismicidade não é desprezível. As regiões que apresentam sismicidade mais alta são alguns estados do Nordeste, devido à sua posição com relação à falha do Atlântico Central, e na parte oeste das Regiões Norte e Centro-Oeste, devido à sua proximidade com a Cordilheira dos Andes.

O trabalho realizado por Falconi e Báez [7] faz um estudo da sismicidade na América do Sul. O já citado estudo mais recente de Falconi [2] apresenta uma análise comparativa das normas de projeto sísmico de seis países da América do Sul. O Brasil não foi incluído nesse estudo, mas a sismicidade presente, principalmente na região Norte do país, pode ser inferida utilizando dados do zoneamento sísmico dos países vizinhos.

Considerando esses estudos e levando em conta a continuidade geográfica entre países vizinhos, o mapa de sismicidade do Brasil foi consolidado por Santos e Souza Lima [1]. Essas mesmas análises foram usadas para definir as zonas sísmicas do Brasil apresentadas na NBR 15421. O zoneamento da sismicidade brasileira

Figura 1 – Sismicidade da América do Sul segundo U.S. Geological Survey, legenda em m/s^2

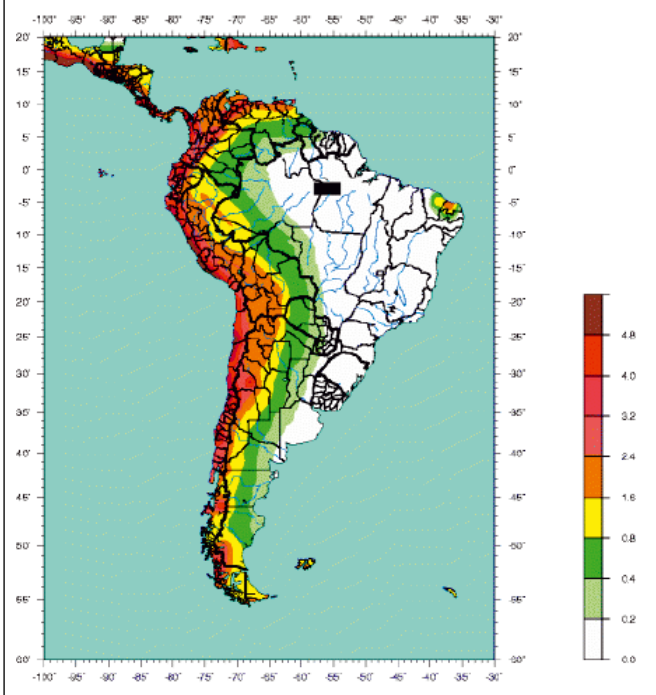


Figura 2 – Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos de classe B (Rocha)

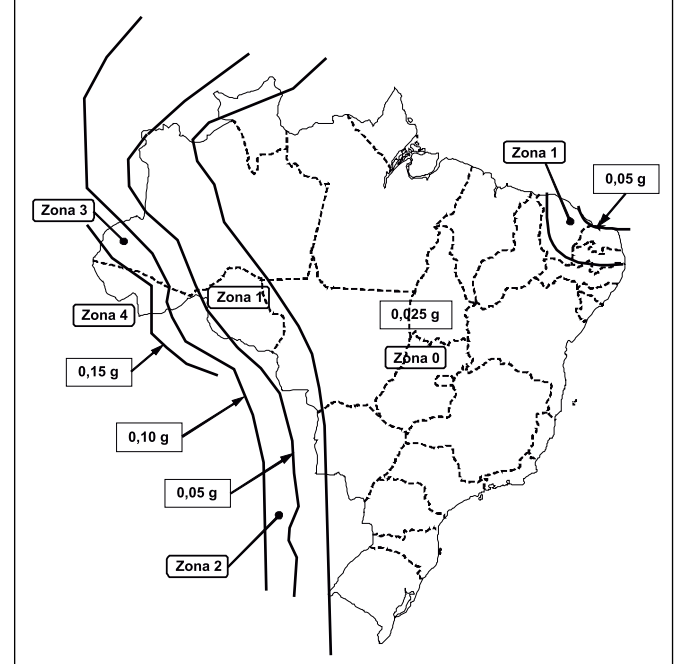
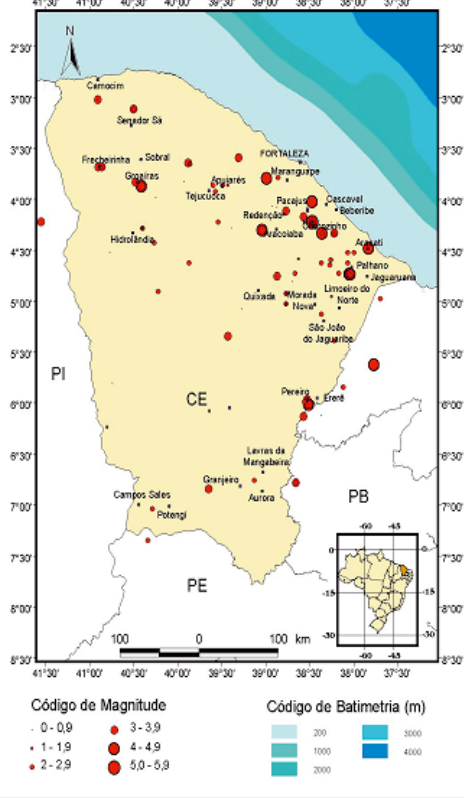


Figura 3 – Mapa da sismicidade no Estado do Ceará



e os respectivos valores de aceleração horizontal nominal a_g são mostrados na Figura 2, sendo g a aceleração da gravidade. Na maior parte do território brasileiro, verifica-se um a_g igual a 0,025g, característica de regiões onde praticamente não ocorrem eventos sísmicos significativos. No entanto, é possível observar também, na Figura 3, a existência de duas regiões, já descritas anteriormente, que refletem as mais altas sismicidades do território nacional. As acelerações definidas nesta figura correspondem à probabilidade nominal de 10% de serem ultrapassadas em 50 anos, o que corresponde a um período de recorrência de 475 anos. A Figura 4 apresenta mapa da sismicidade no estado do Ceará apresentado por Marza et al [8], contendo sismos históricos e instrumentados no intervalo de tempo de 1808 até 2000. São apresentados apenas os sismos mais expressivos, sendo que o número total de eventos detectados na região ultrapassa a casa das dezenas de milhares. A cobertura temporal do catálogo sísmico do estado do Ceará é muito não uniforme, assim como a da maioria dos catálogos sísmicos. O lapso temporal do catálogo é dividido em duas partes, cada uma com 96 anos. A primeira parte, intervalo entre 1808 e 1904, abrange somente 14 eventos, enquanto que a segunda parte, intervalo entre 1905 e 2000, abrange 348 eventos. Isso se dá pelo fato do monitoramento sísmográfico ter melhorado especialmente nos últimos 20 anos. De acordo com a Tabela 1, pode-se observar que o catálogo sísmico cearense engloba 20 eventos de magnitude maior ou igual a 4,0, comprovando a importante sismicidade da região.

3. Cálculo da recorrência sísmica

Gutenberg e Richter [9] realizaram estudos de recorrência sísmica relacionando frequência anual acumulada, propondo a expressão abaixo:

$$\log(\sum N) = a - b \cdot M \tag{1}$$

Nessa expressão, a e b são coeficientes que dependem da sismicidade local, M é a magnitude e $\sum N$ é o número total de terremotos com magnitude equivalente ou superior a M num período de um ano.

A expressão anterior também pode ser escrita como:

$$\sum N = \frac{1}{T_M} = c \cdot e^{(-d \cdot M)} \tag{2}$$

onde T_M é o período de recorrência de um terremoto com magnitude, no mínimo, equivalente a M , sendo:

Figura 4 – Área de estudo discretizada no Estado do Ceará

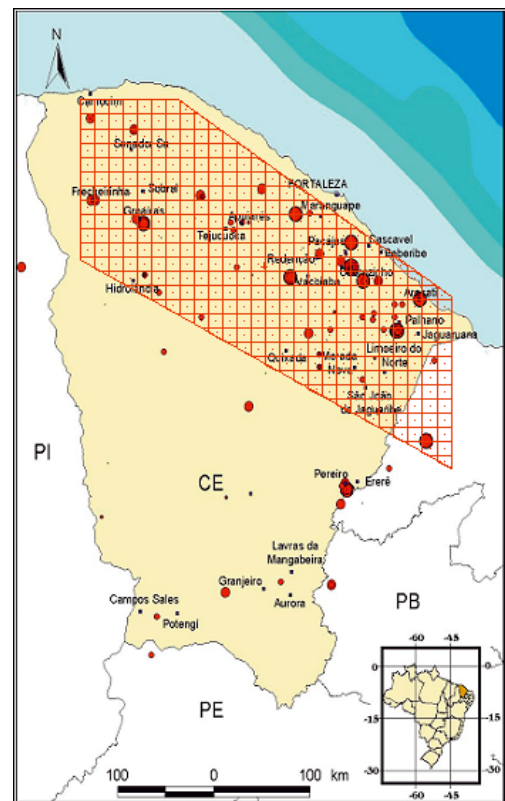


Tabela 1 – Sismos com magnitude $m_b > 4,0$ na região em análise ocorrido no período de 1808 a 2000, fonte (Marza et al. (8)). I_0 representa a intensidade (escala Mercalli Modificada), Mag. representa a magnitude

Nº	Data AAAA/MM/DD	Lat.(°)	Long.(°)	Erro (km)	Local	UF	I_0 (MM)	Cat.	Área 10^3 km^2	Mag. m_b
1	1808/08/08	-05,70	-37,70	100	Açú	RN	VI	B	230	4,8
2	1903/02/14	-04,38	-38,97	30	Baturité	CE	VI	C	12	4,1
3	1903/02/15	-04,38	-38,97	30	Baturité	CE	VI	C	12	4,1
4	1903/02/16	-04,38	-38,97	30	Baturité	CE	VI	C	12	4,1
5	1919/11/24	-03,87	-38,92	50	Maranguape	CE	IV	B	70	4,5
6	1928/04/14	-04,56	-37,76		Aracati	CE	VI	C	10	4,0
7	1968/02/15	-06,99	-38,44	10	Perreiro	CE	VI	B	11	4,1
8	1968/02/23	-06,29	-38,44	5	Perreiro	CE	VII	A	84	4,6
9	1980/11/20	-04,30	-38,40	10	Pacajús	CE	VII	A	1000	5,2
10	1988/03/20	-03,25	-40,34	2	Groaíras	CE	VI-VII	I		4,1
11	1988/10/18	-04,81	-37,98	2	Palhano	CE	VI	I		4,2
12	1988/10/29	-04,81	-37,97	2	Palhano	CE	VI	I		4,1
13	1989/03/25	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,1
14	1989/03/26	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,5
15	1989/05/26	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,1
16	1989/08/28	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,3
17	1989/10/17	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,2
18	1991/04/19	-03,90	-39,39	20	Taperuaba	CE	VI-VII	I	196	4,8
19	1998/06/04	-04,41	-38,29	2	Cascavel	CE		I		4,0
20	2000/07/04	-04,10	-38,40		Pitombeiras	CE		I		4,1

$$T_M(M) = \frac{1}{\sum N(M)} \quad (3)$$

Vale salientar que adotar essa fórmula para a caracterização sísmica implica em considerar a “sismicidade difusa”, conforme definido por McGuire [10]. Isso significa que para esse tipo de região intra-placas tectônicas, a sismicidade futura é assumida como tendo distribuições de propriedades e pontos de liberação de energia que não variam no tempo e no espaço. O risco sísmico não é avaliado levando em conta falhas ativas que apresentem um dado potencial sísmico, mas das fontes difusas distribuídas na província tectônica considerada.

Marza et al. [8] desenvolveram um estudo de caracterização da sismicidade do Ceará que pode ser considerado representativo e conservador o bastante para a região em questão.

Foi feita por estes autores a análise estatística dos terremotos utilizando a relação frequência-magnitude com a expressão de Gutenberg e Richter, Equação 1 ou Equação 2. A distribuição cumulativa das frequências dos sismos foi representada pela relação a seguir:

$$\log(\sum N) = 2,92 - 1,01 \cdot M \quad (4)$$

O resultado do trabalho de Marza et al. comprovou que o potencial sísmico do Estado do Ceará não é desprezível e as probabilidades de ocorrência de eventos significativos (magnitude maior ou igual a 4) são bastante altas, conforme pode ser verificado graficamente na Figura 3.

4. Metodologia utilizada para análise de dados sísmicos

O estudo feito para a região Nordeste se restringe ao estado do Ceará, uma vez que o mesmo é considerado como sendo a área mais ativa da região em termos sísmicos, conforme ressaltado anteriormente. A delimitação da área sísmica em estudo, conforme pode ser observado na Figura 4, foi feita procurando envolver o maior número de pontos de ocorrência de sismos com as maiores magnitudes e regiões mais densas de pontos (no caso, acumulados na região norte do Ceará). A região discretizada corresponde a uma área de 78.729km² no total, a qual foi dividida em 351 sub-regiões com 225km² cada uma (no caso dos quadrados perfeitos). Das sub-regiões posicionadas no contorno da área total, foram consideradas apenas aquelas que possuem uma área maior ou igual à metade da área de um quadrado perfeito. Foi utilizado nos estudos um escalonamento discretizado, com 8 valores limites de magnitude: $M_1 \geq 3,5$; $M_2 \geq 4,0$; $M_3 \geq 4,5$; $M_4 \geq 5,0$; $M_5 \geq 5,5$; $M_6 \geq 6,0$; $M_7 \geq 6,5$; $M_8 \geq 7,0$.

Utilizando a Equação 4 e considerando a discretização acima, pode-se avaliar o número de eventos que ocorreriam nos seguintes intervalos: $3,5 \leq M \leq 4,0$; $4,0 \leq M \leq 4,5$; $4,5 \leq M \leq 5,0$; $5,0 \leq M \leq 5,5$;

Tabela 2 - Número de eventos região Nordeste

M	$\log(\Sigma^N)=2,92-1,01M$	Σ^N (em 1 ano)	Σ^N (em 1.000.000 anos)	Intervalos	Σ^N (intervalos)	Cada sub-região (/351)
M≥3,5	3,5	-0,615	0,24266101	242661,0095		
				3,5≤M≤4,0	166803,2520	475,2229
M≥4,0	4,0	-1,12	0,075857758	75857,7575		
				4,0≤M≤4,5	52144,0204	148,5585
M≥4,5	4,5	-1,625	0,023713737	23713,7371		
				4,5≤M≤5,0	16300,6346	46,4406
M≥5,0	5,0	-2,13	0,007413102	7413,1024		
				5,0≤M≤5,5	5095,7078	14,5177
M≥5,5	5,5	-2,635	0,002317395	2317,3946		
				5,5≤M≤6,0	1592,9587	4,5383
M≥6,0	6,0	-3,14	0,000724436	724,4360		
				6,0≤M≤6,5	497,9715	1,4187
M≥6,5	6,5	-3,645	0,000226464	226,4644		
				6,5≤M≤7,0	155,6699	0,4435
M≥7,0	7,0	-4,15	7,07946E-05	70,7946		

5,5 ≤ M ≤ 6,0; 6,0 ≤ M ≤ 6,5; 6,5 ≤ M ≤ 7,0; e dividi-los pelo número de sub-regiões que compõem a área discretizada. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

5. Distribuição probabilística de acelerações

Ainda não há nenhum estudo concluído que defina funções de atenuação sísmica para o território brasileiro. Portanto, será considerado que a função de atenuação proposta por Toro et al. [11] para as regiões do centro e leste dos Estados Unidos, que são áreas consideradas de baixa sismicidade dentro do território americano, pode ser utilizada no caso do Brasil, já que este apresenta condições similares de baixa sismicidade. A função adotada é a seguinte:

$$\ln(a_g) = C_1 + C_2(M - 6) + C_3(M - 6)^2 - C_4 \ln R_M - (C_5 - C_4) \max[\ln(R_M/100), 0] - C_6 R_M \quad (5)$$

Sendo a_g a aceleração espectral horizontal (em g); $R_M = (r^2 + C_7^2)^{1/2}$; r a distância ao epicentro (km); M a magnitude do sismo; C_1, C_2, \dots, C_7 são constantes que são diferentes para diferentes valores de frequência espectral e seus valores estão na Tabela 3.

6. Cálculo dos períodos de recorrência

A partir dos resultados dos valores de acelerações espectrais calculados para cada elemento de área discretizado, e para cada faixa de magnitudes, é possível se fazer um estudo de quantas sub-regiões (elementos discretizados) obtiveram acelerações (em g's) dentro dos intervalos pré-determinados que serão apresentados em seguida. De posse desses valores, basta multiplicá-los pelo número de eventos que ocorrem em 1.000.000 anos em cada sub-região de acordo com a magnitude adotada, conforme apresentado na Tabela 2 e fazer o somatório para cada intervalo de aceleração. Os valores de período de recorrência foram obtidos invertendo os valores de frequência acumulada. Os resultados dos cálculos foram listados de acordo com a magnitude adotada e com os intervalos de acele-

Tabela 3 - Coeficientes da equação de atenuação

Freq. (Hz)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
0,5	-0,97	2,52	-0,47	0,93	0,60	0,0012	7,0
1	-0,12	2,05	-0,34	0,90	0,59	0,0019	6,8
2,5	0,90	1,70	-0,26	0,94	0,65	0,0030	7,2
5	1,60	1,24	0,00	0,98	0,74	0,0039	7,5
10	2,36	1,23	0,00	1,12	1,05	0,0043	8,5
25	3,34	1,19	0,00	1,46	1,84	0,0010	10,5
35	3,87	1,19	0,00	1,58	1,90	0,0005	11,1
PGA	2,07	1,20	0,00	1,28	1,23	0,0018	9,3

Tabela 4 – Período de recorrência para o PGA (“Peak Ground Acceleration”)

Número de sub-regiões com acelerações espectrais dentro dos intervalos definidos e para cada magnitude adotada - PGA																
Valores de Magnitude	Intervalos de acelerações espectrais (em g's)															
	0,0001-0,0002	0,0002-0,0005	0,0005-0,001	0,001-0,002	0,002-0,005	0,005-0,01	0,01-0,02	0,02-0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	0,05-0,06	0,06-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5-1,0	≥1,0
M=4,0		29	120	92	82	19	7	1	1							
M=4,5			44	117	122	43	18	3	2	1	1					
M=5,0				62	143	88	38	9	4	3	0	4				
M=5,5				2	116	100	81	24	10	5	4	5	4			
M=6,0					19	114	99	50	25	12	7	14	7	4		
M=6,5						29	120	55	37	31	21	30	19	7	2	
M=7,0							44	71	45	33	24	65	44	21	3	1
Produto do número de sub-regiões com acelerações espectrais delimitadas acima pelo número de eventos de cada sub-região em 1.000.000 anos de acordo com a magnitude - PGA																
Valores de Magnitude	Intervalos de acelerações espectrais (em g's)															
	0,0001-0,0002	0,0002-0,0005	0,0005-0,001	0,001-0,002	0,002-0,005	0,005-0,01	0,01-0,02	0,02-0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	0,05-0,06	0,06-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5-1,0	≥1,0
M=4,0		13781,46	57026,75	43720,51	38968,28	9029,24	3326,56	475,22	475,22							
M=4,5			6536,57	17381,34	18124,14	6388,02	2674,05	445,68	297,12	148,56	148,56					
M=5,0				2879,32	6641,01	4086,77	1764,74	417,97	185,76	139,32	0,00	185,76				
M=5,5				29,04	1684,05	1451,77	1175,93	348,42	145,18	72,59	58,07	72,59	58,07			
M=6,0					86,23	517,37	449,29	226,92	113,46	54,46	31,77	63,54	31,77	18,15		
M=6,5						41,14	170,24	78,03	52,49	43,98	29,79	42,56	26,96	9,93	2,84	
M=7,0							19,51	31,49	19,96	14,64	10,64	28,83	19,51	9,31	1,33	0,44
Somatório	0	13781,46	63563,32	64010,20	65503,70	21514,30	9580,34	2023,72	1289,19	473,54	278,83	393,28	136,31	37,40	4,17	0,44
Resultados - PGA																
Frequência Acumulada	242590,21	242590,21	228808,75	165245,42	101235,22	35731,52	14217,22	4636,88	2613,16	1323,97	850,43	571,59	178,32	42,01	4,61	0,44
Período (anos)	4,12	4,12	4,37	6,05	9,88	27,99	70,34	215,66	382,68	755,30	1175,88	1749,50	5607,98	23804,42	216853,88	2254791,43

rações espectrais. Como exemplo dos resultados dos estudos desenvolvidos, apresentam-se os resultados obtidos para o PGA (“peak ground acceleration”), correspondente à frequência de 0 hertz, e para a frequência de 10 hertz, respectivamente nas Tabelas 4 e 5.

7. Acelerações horizontais características

De acordo com a NBR 15421 [3], o período de recorrência estabelecido como critério básico para definição dos valores característicos de acelerações horizontais é de 475 anos. Já a ASCE [12] assume como critério que os valores

característicos de acelerações horizontais devam ser de 2/3 dos valores correspondentes ao período de recorrência de 2475 anos.

A seguir, são apresentados os gráficos de aceleração horizontal (g's) versus período de recorrência (anos) calculados para a região Nordeste (Figuras 5 e 6). Nesses gráficos, as interseções das curvas correspondentes a cada um dos períodos considerados para a construção dos espectros, com as retas verticais correspondentes aos períodos de recorrência de 475 anos e de 2475 anos, fornecem os valores das acelerações a serem lançados nos espectros de igual probabilidade, lembrando-se que no último caso, o fator igual a 2/3 deve ser aplicado.

Tabela 5 – Período de recorrência para frequência de 10 hertz

Número de sub-regiões com acelerações espectrais dentro dos intervalos definidos e para cada magnitude adotada - F=35Hz																
Valores de Magnitude	Intervalos de acelerações espectrais (em g's)															
	0,0001-0,0002	0,0002-0,0005	0,0005-0,001	0,001-0,002	0,002-0,005	0,005-0,01	0,01-0,02	0,02-0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	0,05-0,06	0,06-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5-1,0	≥1,0
M=4,0			20	137	124	41	16	7	2	2	2	2				
M=4,5				36	170	85	34	12	5	2	3	2	2			
M=5,0					106	117	73	23	10	6	3	7	4	2		
M=5,5					4	122	109	46	21	14	6	15	10	4		
M=6,0						12	134	61	41	24	19	29	18	10	3	
M=6,5							23	84	53	39	24	59	41	21	5	2
M=7,0								4	35	52	35	85	82	40	11	7
Produto do número de sub-regiões com acelerações espectrais delimitadas acima pelo número de eventos de cada sub-região em 1.000.000 anos de acordo com a magnitude - F=35Hz																
Valores de Magnitude	Intervalos de acelerações espectrais (em g's)															
	0,0001-0,0002	0,0002-0,0005	0,0005-0,001	0,001-0,002	0,002-0,005	0,005-0,01	0,01-0,02	0,02-0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	0,05-0,06	0,06-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5-1,0	≥1,0
M=4,0			9504,46	65105,54	58927,64	19484,14	7603,57	3326,56	950,45	950,45	0,00	950,45				
M=4,5				5348,11	25254,95	12627,47	5050,99	1782,70	742,79	297,12	445,68	297,12	297,12			
M=5,0					4922,70	5433,55	3390,16	1068,13	464,41	278,64	139,32	325,08	185,76	92,88		
M=5,5					58,07	1771,16	1582,43	667,81	304,87	203,25	87,11	217,77	145,18	58,07		
M=6,0						54,46	608,13	276,84	186,07	108,92	86,23	131,61	81,69	45,38	13,61	
M=6,5							32,63	119,17	75,19	55,33	34,05	83,70	58,17	29,79	7,09	2,84
M=7,0								1,77	15,52	23,06	15,52	37,70	36,37	17,74	4,88	3,10
Somatório	0	0,00	9504,46	70453,64	89163,36	39370,78	18267,91	7242,99	2739,30	1916,76	807,90	2043,42	804,28	243,87	25,59	5,94
Resultados - F=35Hz																
Frequência Acumulada	242590,21	242590,21	242590,21	233085,75	162632,11	73468,75	34097,97	15830,06	8587,07	5847,77	3931,00	3123,10	1079,68	275,40	31,53	5,94
Período (anos)	4,12	4,12	4,12	4,29	6,15	13,61	29,33	63,17	116,45	171,01	254,39	320,19	926,20	3631,13	31717,03	168296,34

Figura 5 – Aceleração horizontal (g's) x Período de Recorrência (anos) para PGA, T =0,04 s e T = 0,1 s

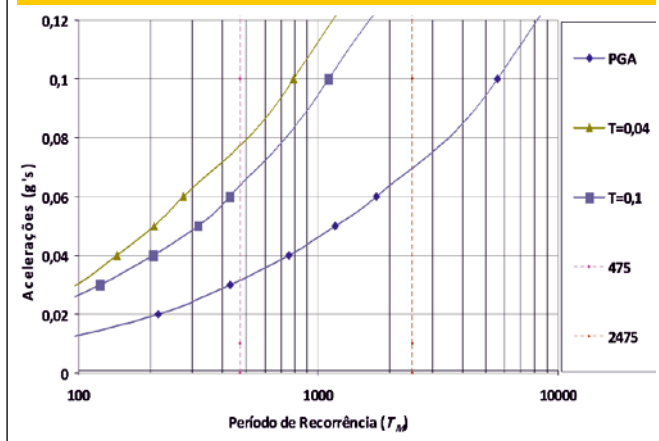
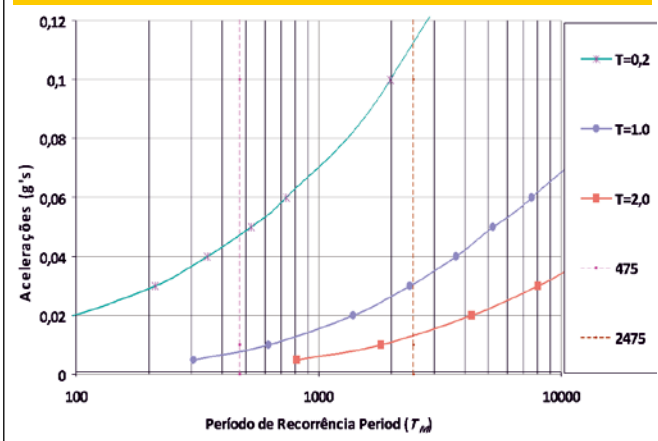


Figura 6 – Aceleração horizontal (g's) x Período de Recorrência (anos) para T =0,2s, T=1,0s e T = 2,0s



8. Espectros de projeto

O conceito de espectro de projeto está naturalmente ligado ao conceito de espectro de resposta. Espectro de resposta pode ser definido como um gráfico que mostra a resposta máxima, seja em termos de deslocamentos, velocidades ou acelerações, em função do período natural para um sistema de um grau de liberdade, considerando uma determinada excitação. Espectros de resposta para aceleração na base são importantes numa análise sísmica, pois as acelerações produzidas por um terremoto são as grandezas mais diretas para caracterizar seus efeitos sobre as estruturas. É possível obter das respostas de um sistema de um grau de liberdade submetido à movimentação da sua base, as equações dos deslocamentos, das velocidades e das acelerações da massa relativos à base da estrutura. Relacionando essas equações, obtém-se uma equação diferencial do movimento relativo cuja solução dá condições para serem calculados os deslocamentos, as velocidades e, posteriormente, as acelerações absolutas. Para sistemas levemente amortecidos, a pseudo-aceleração S_a , definida na equação 5.1, é uma boa aproximação da aceleração absoluta.

$$S_a = \omega^2 \cdot S_d \tag{6}$$

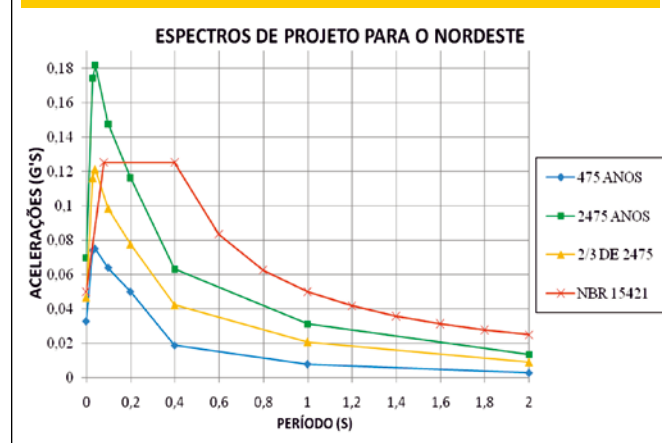
Onde ω representa a frequência circular e S_d o deslocamento espectral.

Os valores máximos das acelerações absolutas são chamados de acelerações espectrais e a variação dessa grandeza em função do período natural constitui os espectros de aceleração, isto é, os espectros de resposta. Espectros de projetos são obtidos a partir de um conjunto de espectros de resposta para sismos acontecidos no local de interesse, através de critérios estatísticos. Logo, o espectro de resposta não tem aplicação direta no projeto ou verificação de estruturas, uma vez que representa um determinado sismo ocorrido num certo local e não se pode ter garantia de que suas características se repitam em sismos futuros. Dentro desse con-

texto, a partir dos gráficos apresentados no item 7, os espectros de resposta são obtidos. Conforme descrito anteriormente, as interseções das curvas correspondentes aos períodos considerados, com as retas correspondentes aos períodos de recorrência de 475 anos e de 2475 anos, fornecem os valores das acelerações dos espectros de igual probabilidade. Estes foram, portanto, os valores de acelerações horizontais utilizados para definir os espectros de projeto apresentados no gráfico mostrado na Figura 7.

A Tabela 6 apresenta os dados de entrada para a definição dos espectros de respostas para a região Nordeste. Nessa tabela, a primeira coluna lista todas as frequências segundo as quais foram feitos os gráficos de aceleração horizontal (g's) x período de recorrência (anos) e a segunda coluna equivale ao inverso da primeira, representando assim os períodos (em segundos) correspondentes a cada frequência estudada. A terceira coluna lista os valores de acelerações espectrais obtidos dos gráficos das Figuras 5 e 6 para o período de recorrência de 475 anos. A quarta coluna lista

Figura 7 – Espectros de projeto para a região Nordeste



os valores de acelerações espectrais para o período de recorrência de 2475 anos. E finalmente, a quinta coluna lista os valores de acelerações espectrais da quarta coluna multiplicados por 2/3 para atender ao critério de valores característicos de acelerações horizontais segundo a ASCE [12].

9. Considerações finais e conclusão

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 7 e do espectro para a região, respectivamente, mostram que o espectro de projeto definido pela NBR 15421 [3] (curva vermelha) é conservador. Vale ressaltar que o espectro definido pela Norma Brasileira leva em consideração um período de recorrência de 475 anos estabelecido como critério básico para definição dos valores característicos de acelerações horizontais. Diante desse conceito, é possível observar nos gráficos que a curva relativa ao espectro da Norma cobre com folga a curva de espectro de resposta considerando um tempo de recorrência de 475 anos (curva azul). Observa-se também que a curva relativa ao espectro de resposta obtido segundo o critério da ASCE [12] (curva amarela), onde é estabelecido que os valores característicos de acelerações horizontais são tidos como 2/3 dos valores correspondentes ao tempo de recorrência de 2475 anos também fica coberta pelo espectro de projeto da NBR 15421 [3].

Portanto, conclui-se ser a NBR 15421[3] conservadora para a região estudada podendo ser adotada, com segurança, como norma de referência para obter o espectro de projeto utilizado nas análises sísmicas das estruturas de edifícios.

10. Referências bibliográficas

- [01] SANTOS, S.H.C., SOUZA LIMA, S. Estudos da Zonificação Sísmica Brasileira Integrada em um Contexto Sul-Americano. *In: Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, Buenos Aires, Argentina, 2004, Anais.
- [02] FALCONI, R.A. Espectros Sísmicos de Riesgo Uniforme para Verificar Desempeño Estructural em Países Latinoamericanos. XVII Seminário Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Mendoza, Argentina, 2003, Anais.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento - NBR 15421, Rio de Janeiro, 2006.
- [04] SANTOS, S.H.C., SOUZA LIMA, S. The New Brazilian Standard for Seismic Design. *In: The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008, Proceedings.
- [05] GeoForschungsZentrum - Potsdam(GFZ). Global Seismic Hazard Map. *In: www.gfzpotdam.de/pb5/pb53/projects/en/gshap/menue_gshap_e.html*, 1999.
- [06] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Seismic Hazard Map of South America. *In: http://earthquake.usgs.gov/research/hazmaps/index.php*, 2006.
- [07] FALCONI, R.A., BÁEZ, A.G.H. Zonificación Sísmica en Países Bolivarianos. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Boletín Técnico, 2000, v.38(3), p.27-41.
- [08] MARZA V.I., BARROS L.V., CHIMPLIGANOND C.N., CAIXETA D.F. Breve Caracterização da Sismicidade no Ceará. Brasília - Observatório Sismológico da Universidade de Brasília.
- [09] GUTENBERG B., RICHTER C.F. Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1944, 185-188.
- [10] MCGUIRE R.K., Seismic Hazard and Risk Analysis. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, California, USA, 2004.
- [11] TORO G.R., ABRAHAMSON N.A., SCHNEIDER J.F. Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties. *Seismological Research Letters* 1997, 41-57.
- [12] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05). Washington, D.C., 2005.

Tabela 6 - Dados de entrada para definição do espectro de resposta (região Nordeste)

Frequência (Hz)	Período (s)	Aceleração Horizontal (g's)		
		475 anos	2475 anos	2/3 de 2475 anos
PGA	0	0,033	0,070	0,046
35	0,03	0,074	0,174	0,116
25	0,04	0,075	0,182	0,121
10	0,1	0,064	0,148	0,098
5	0,2	0,050	0,116	0,077
2,5	0,4	0,019	0,063	0,042
1	1	0,008	0,031	0,021
0,5	2	0,003	0,013	0,009