Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos

Sergio Hampshire C. Santos
Silvio de Souza Lima

Escola Politécnica – UFRJ e
Associação Brasileira de Pontes e Estruturas - ABPE

Parte I –Efeitos dos Sismos

São Francisco - USA- 1906

Distrito Financeiro

Sismo seguido de incêndio

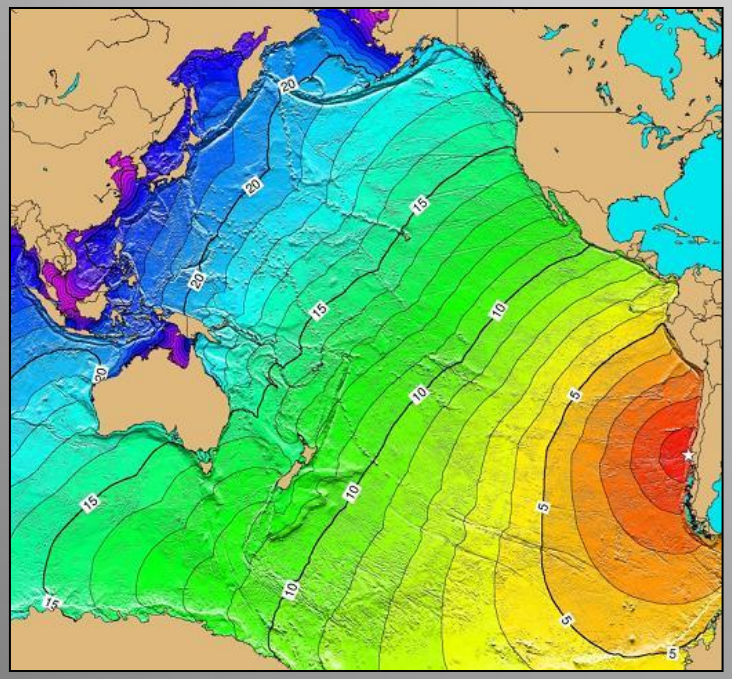
São Francisco - USA - 1906

Distrito de Chinatown

“Grande Kanto” – Japão (1923)

Chile – 1960
Terremoto de Valdívia

Maior terremoto já registrado
Magnitude de 9,5

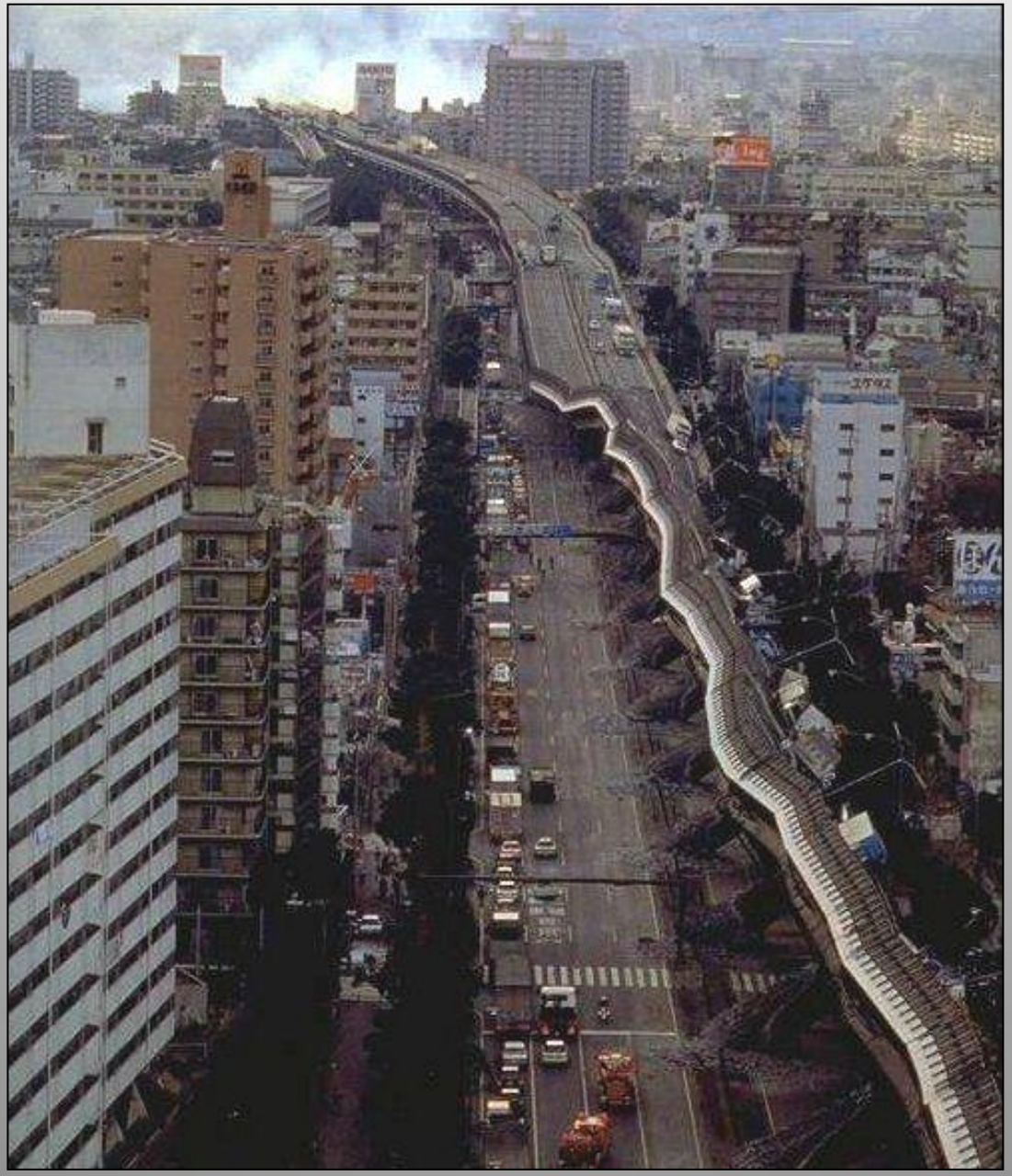


Tsunami gerado – as linhas mostram o tempo de viagem, em horas, da frente de onda.

México - 1985

- 2.831 prédios danificados (880 ruíram)
- 13 hospitais destruídos
- 50.000 desabrigados
- 10.000 mortos

Kobe – Japão - 1995



Kobe – Japão - 1995

Kobe – Japão - 1995

Kobe – Japão - 1995

Kobe – Japão - 1995

Izmit – Turquia - 1999

Liquefação

Irã - 2003

Sichuan – China - 2008

Haiti - 2010

Haiti - 2010

Catedral de Porto Príncipe

Antes

Depois

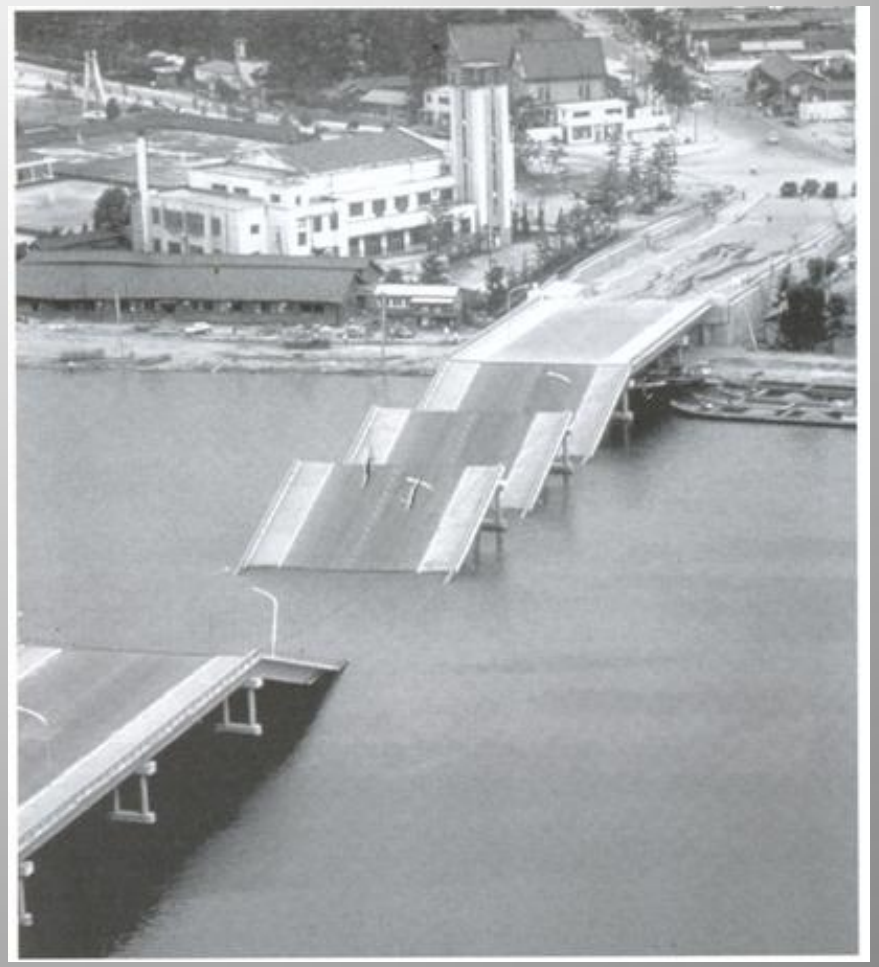
Haiti - 2010

Sede da ONU

Sismo de João Câmara (RN)
30/11/1986, Magnitude 5,1

Efeitos do sismo na zona rural

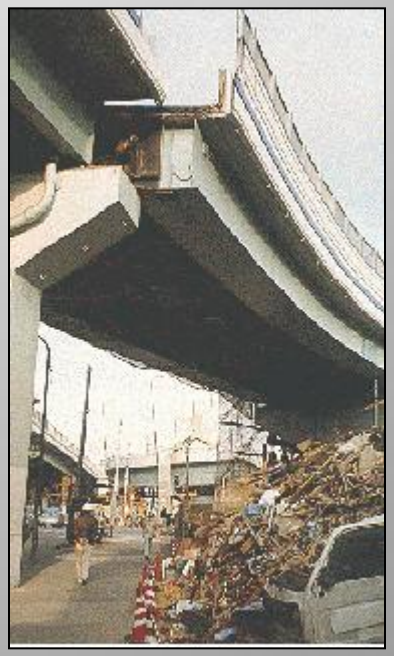
Efeitos de Liquefação do Solo



Ruína de andar intermediário.

Flambagem na base do tanque (elephant foot failure)

Falta de apoio, provavelmente por falta de dispositivo para restringir o deslocamento do apoio e/ou comprimento inadequado do berço dos apoios.



Ruína do primeiro andar devido a existência do “andar fraco” (soft storey).

Parte II – Sismologia

- Os terremotos são os mais destrutivos desastres naturais, em perdas humanas e materiais.
- No século XX uma média de 17.000 vidas foram perdidas por ano, como consequência de terremotos.
- Alguns dos sismos mais arrasadores:
  - Gansu (1920) e Xining (1927) cada um com cerca de 200.000 mortos
  - Tangshan (1976) com 225.000 mortos
  - Messina (1908) na Itália com 70.000 mortos.
  - Haiti (2010), cerca de 100.000 pessoas só em Porto Príncipe.

O que é um Terremoto ?

É a liberação súbita de energia na crosta terrestre provocando movimentos das camadas de solo que se propagam em todas as direções.

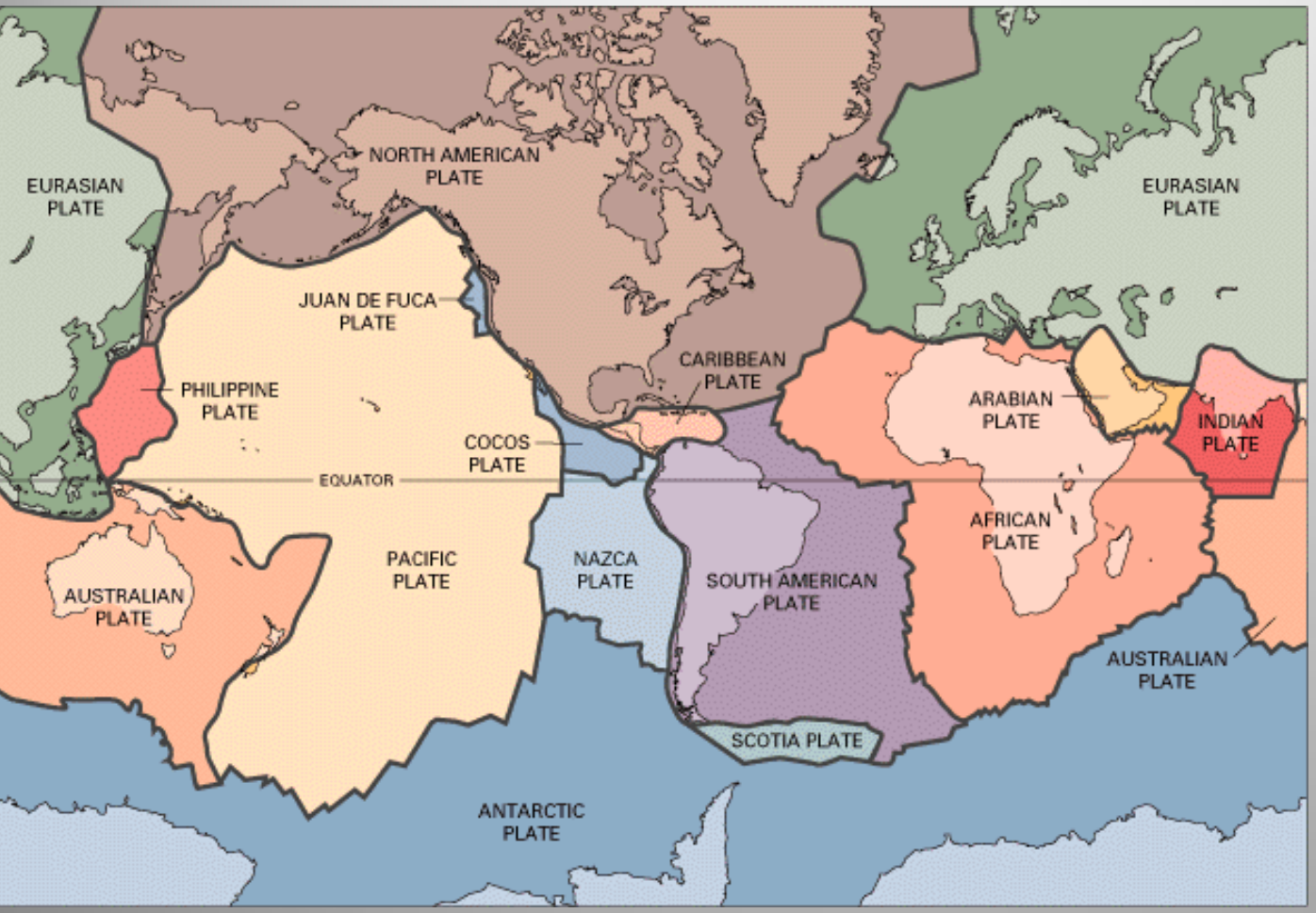
O que origina um Terremoto ?

A energia liberada pode ter como origem diferentes fontes, como deslocamento da crosta terrestre (origem tectônica), erupção vulcânica, explosão provocada pelo homem, ruptura de cavernas subterrâneas, etc.

Como explicar um terremoto de origem tectônica?

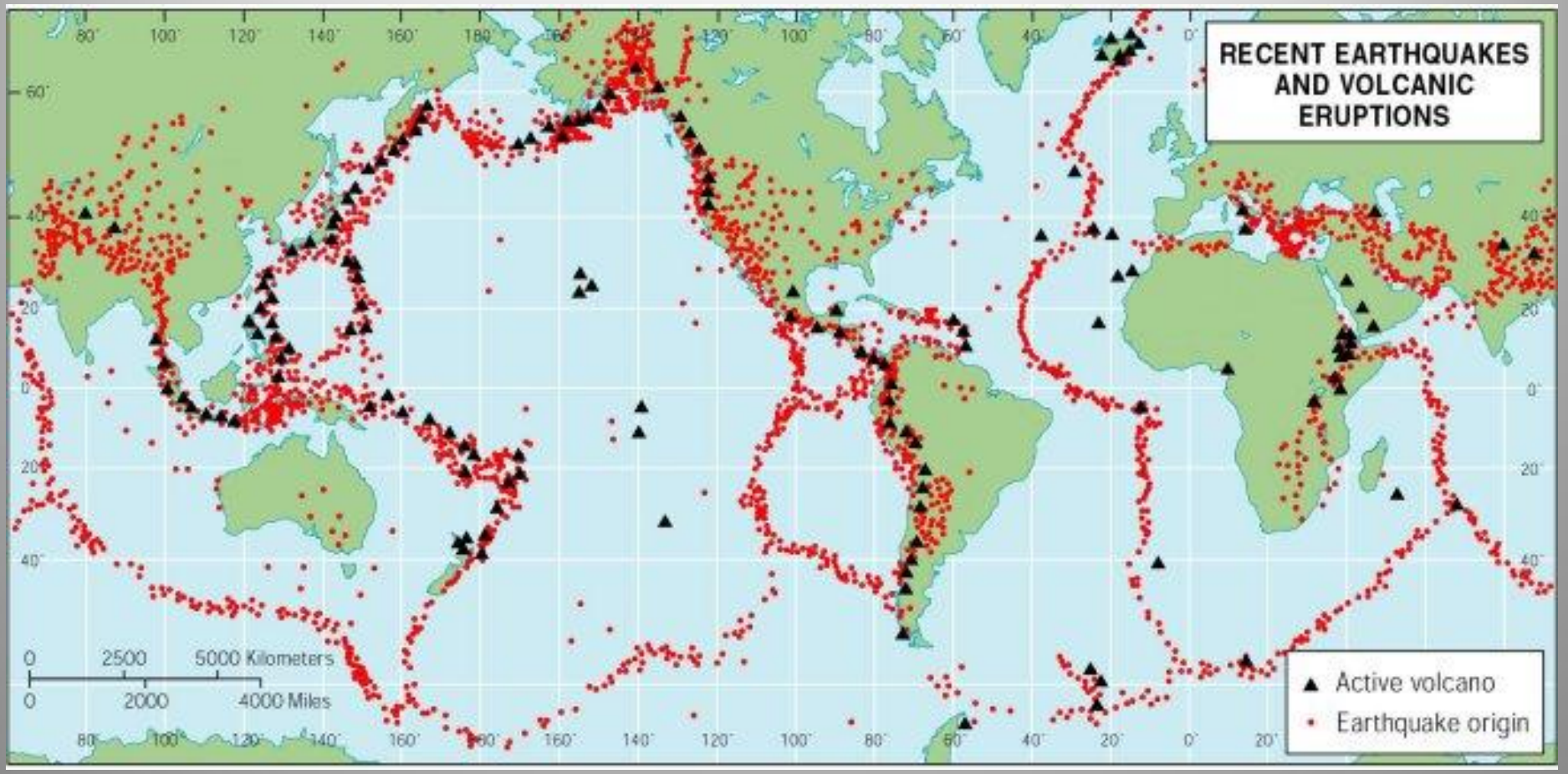
A teoria das placas tectônicas explica a ocorrência de terremotos, como decorrentes dos deslocamentos das placas, que flutuam sobre o magma. A teoria tem origem na constatação de que os continentes estão à deriva.

As Placas Tectônicas

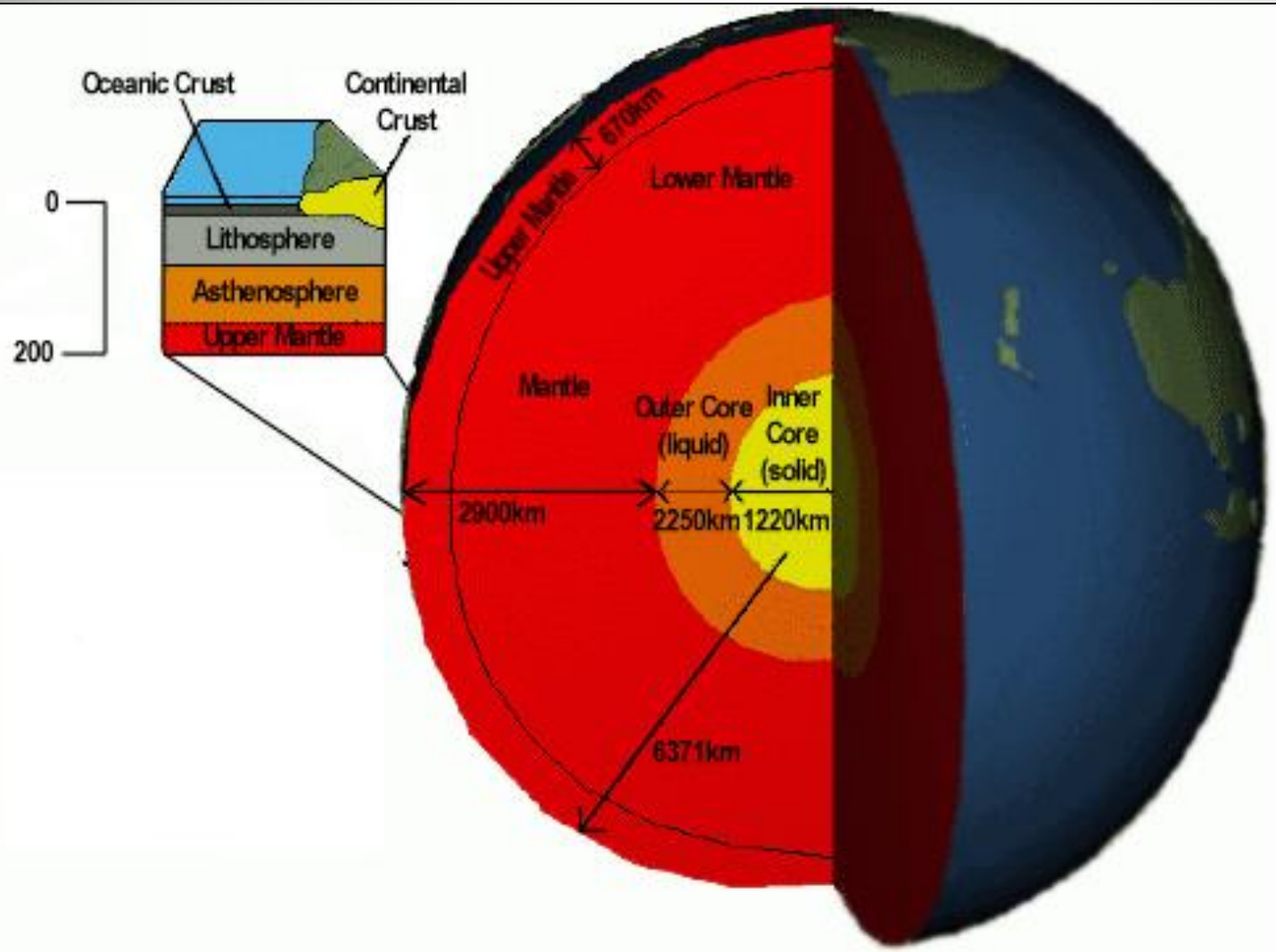


1. Placa Africana
2. Placa da Antártica
3. Placa Arábica
4. Placa Australiana
5. Placa do Caribe
6. Placa de Cocos
7. Placa Eurasiana
8. Placa Indiana
9. Placa Juan de Fuca
10. Placa de Nazca
11. Placa Norte Americana
12. Placa do Pacífico
13. Placa das Filipinas
14. Placa de Scotia
15. Placa Sul Americana

Distribuição Mundial de Terremotos e Vulcões

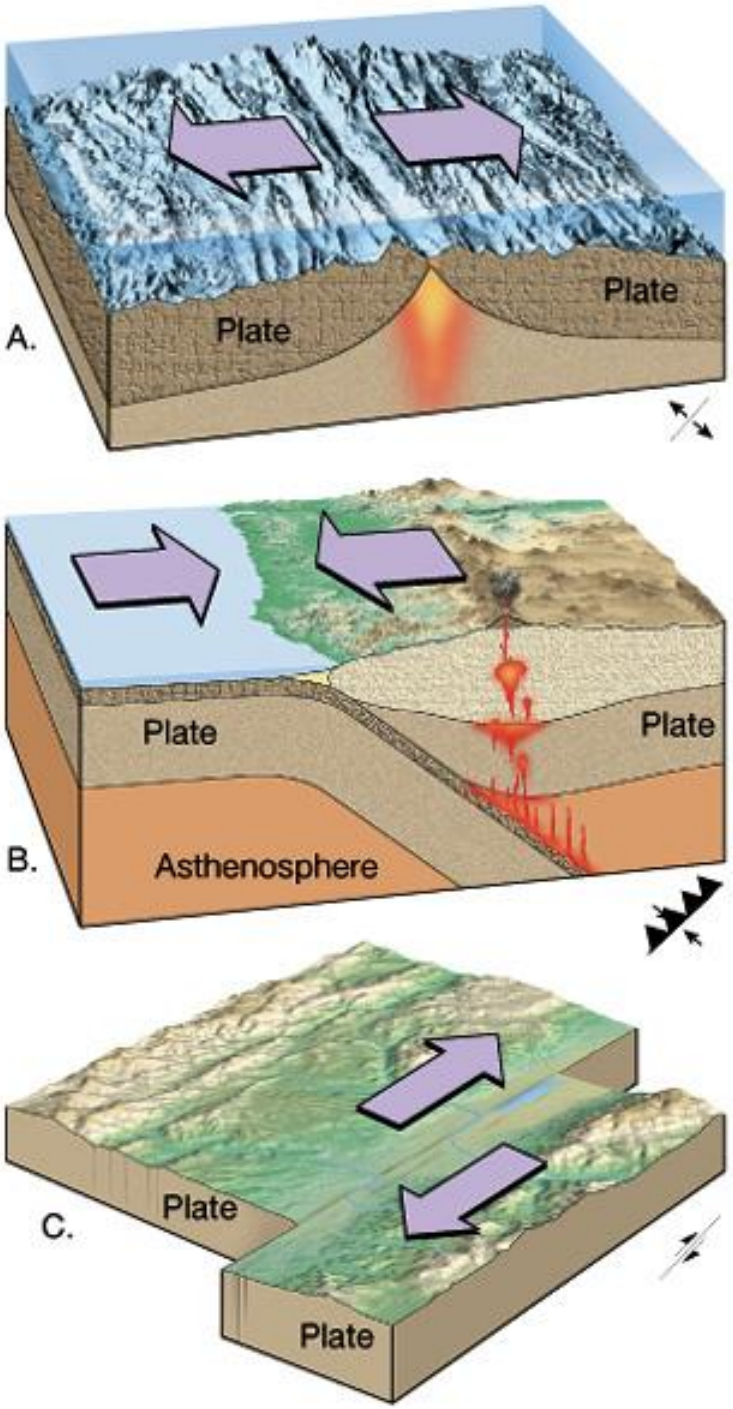


- As placas são blocos estáveis de rocha com espessura aproximada de 100 km formando a crosta ou litosfera e a parte superior do manto.
- A crosta é a camada externa da placa, com espessura não uniforme entre 25 e 60 km nas regiões continentais e 4 e 6 km sob os oceanos.
- A litosfera se movimenta sobre uma camada quente e plástica com cerca de 400 km de espessura. Os movimentos horizontais da litosfera acontecem devido às correntes de convecção no manto.
- Observa-se grande atividade sísmica nos limites das placas, devido ao movimento relativo entre as elas.
- Além das grandes placas existem placas menores que também se movimentam, indicando que um terremoto pode ocorrer em qualquer lugar no mundo.


Oceanic Crust
Continental Crust
0
200
Lithosphere
Asthenosphere
Upper Mantle
Upper Mantle
670km
Lower Mantle
Mantle
Outer Core (liquid)
Inner Core (solid)
2900km
2250km
1220km
6371km

Em seus limites, o encontro de duas placas pode acontecer segundo três formas básicas:

Divergente	As duas placas se afastam, podendo haver o afloramento de magma.
Convergente	As duas placas se aproximam, acontecendo a colisão entre as mesmas, podendo uma se sobrepor a outra (subducção).
Transformante	As duas placas deslizam uma na outra sem que haja convergência ou divergência.



divergente

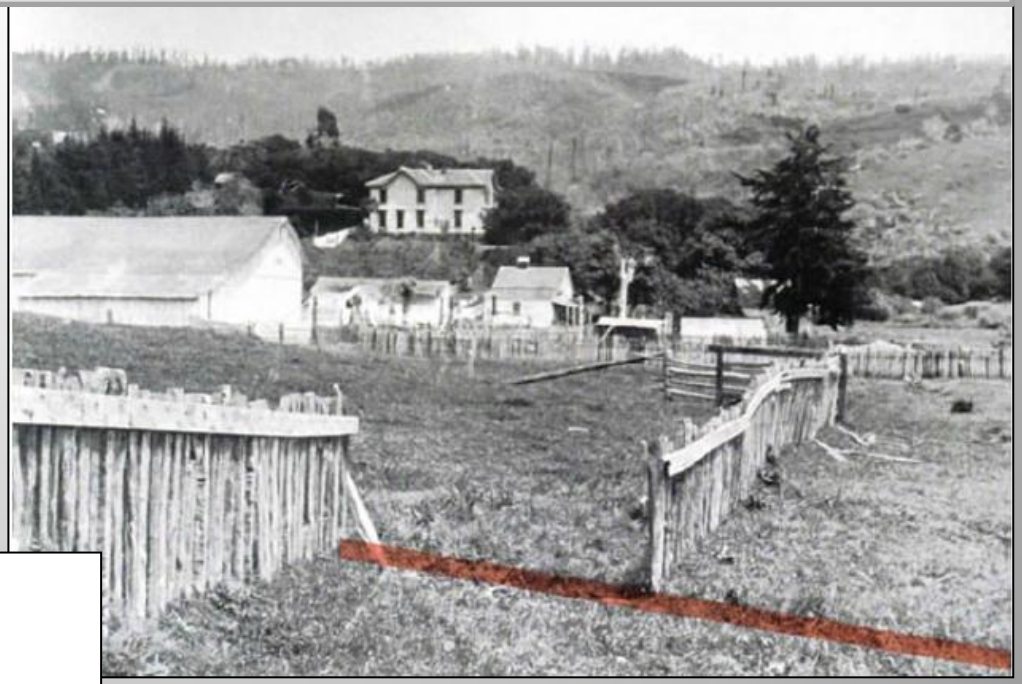
convergente com subducção

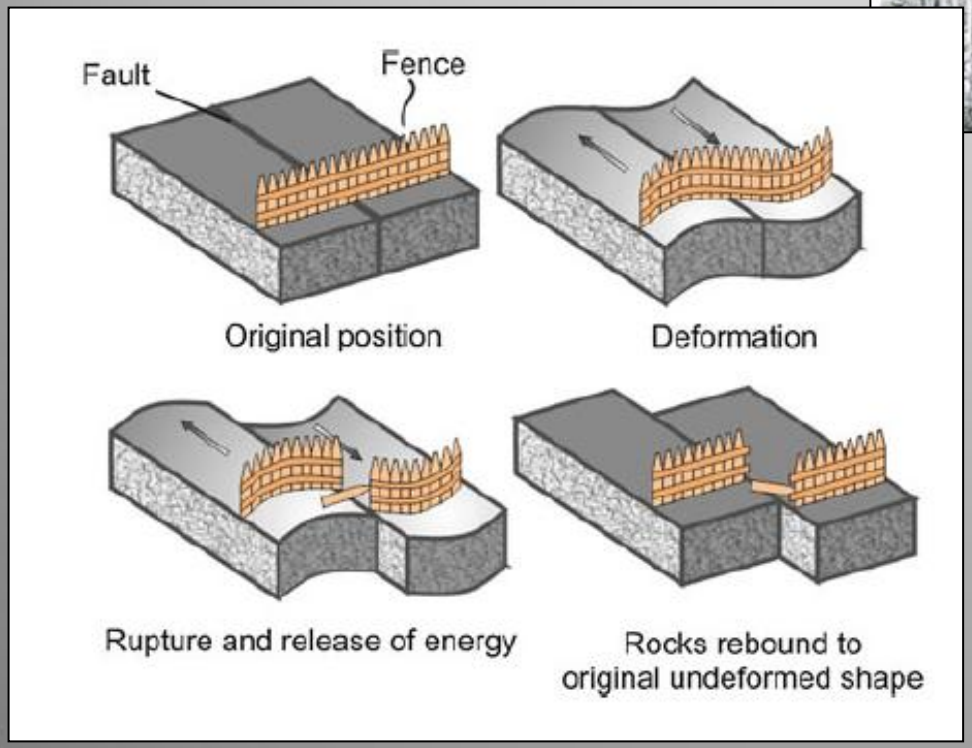
transformante

- O encontro da Placa do Pacífico com a Placa Norte Americana é do tipo transformante.
- As placas se movimentam na direção noroeste, mas com velocidades diferentes.

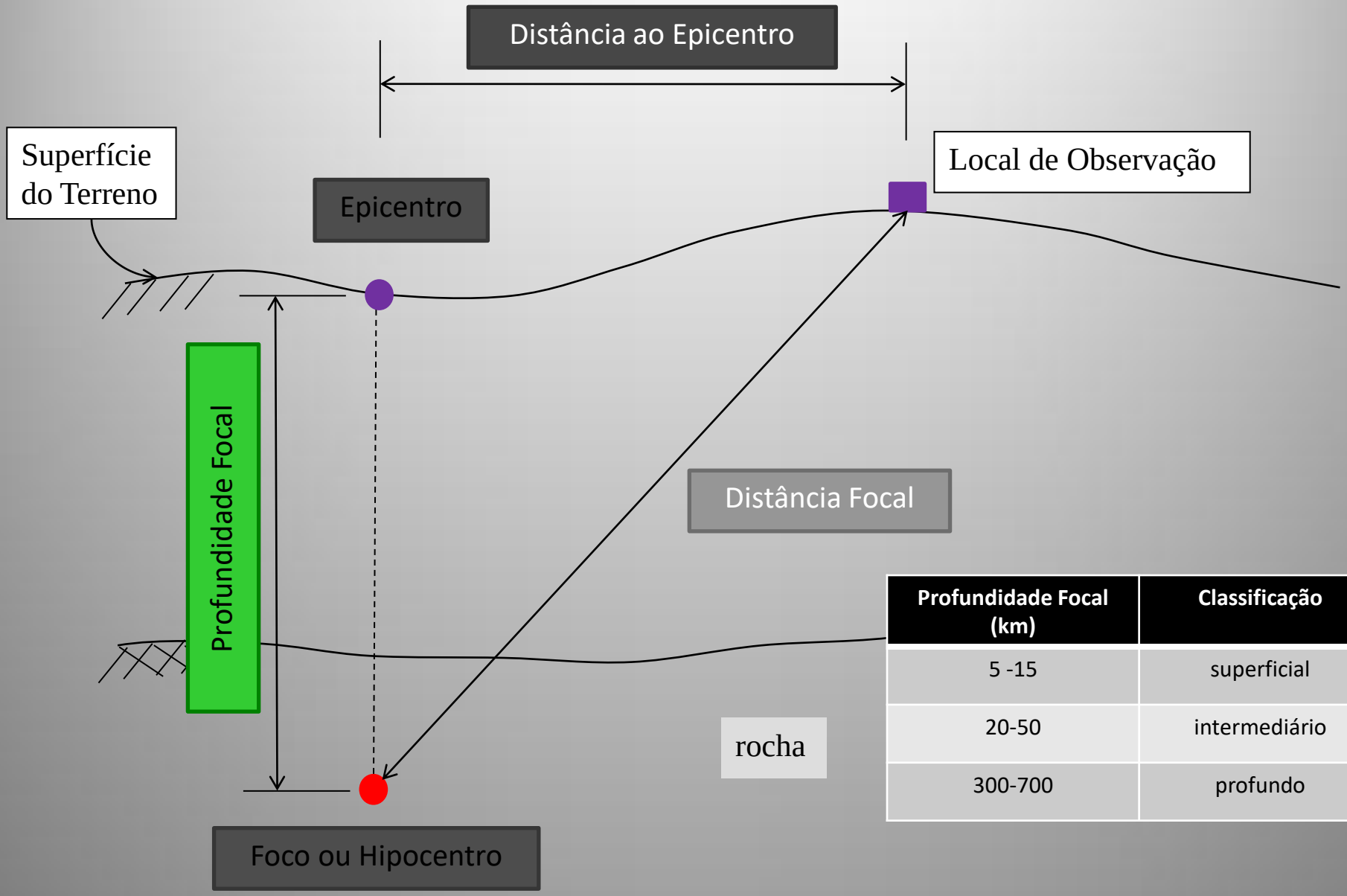
- Nas bordas das placas podem ocorrer grandes deformações.
- Quando as tensões excedem a resistência do material da placa a energia de deformação é liberada. Esta energia é dissipada como calor, na ruptura da rocha e como ondas elásticas. As ondas dão origem ao terremoto (Teoria de Reid).
- Cerca de 95% dos terremotos acontecem nas bordas das placas. Entretanto, os sismos não se restringem as bordas, podendo acontecer em qualquer lugar, com danos consideráveis.
- Exemplos de sismos no interior de placa (inter-placa):
  - Newcastle (Austrália) 1988;
  - Dahsour (Egito) 1992;
  - Região de New Madrid (USA) entre 1811 e 1812.

Falha de San Andreas, Terremoto de São Francisco 1906





Epicentro e Hipocentro



Profundidade Focal (km)	Classificação
5 -15	superficial
20-50	intermediário
300-700	profundo

Ondas Sísmicas

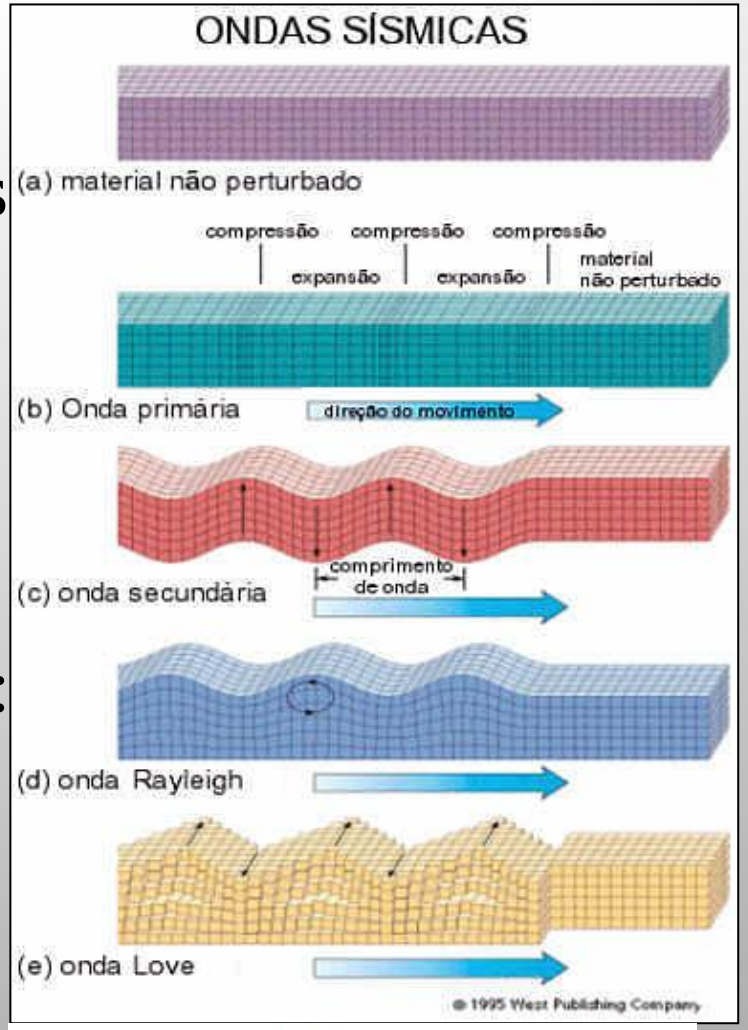
Categorias de ondas sísmicas:

- Ondas de Volume:

- Onda Primária (P)
- Onda Secundária (S)

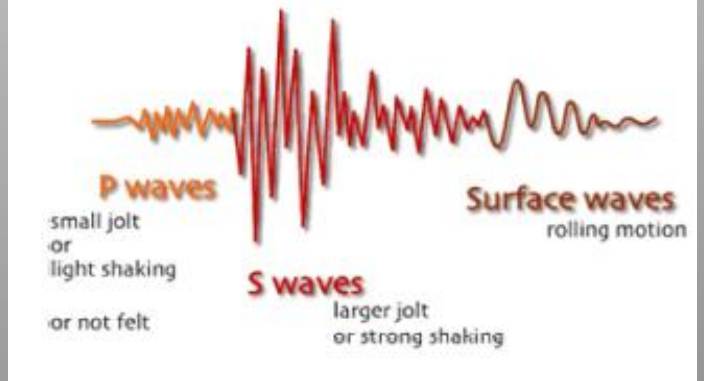
- Ondas de Superfície:

- Onda de Rayleigh (R)
- Onda de Love (L)



ondas de volume ou de corpo (body waves)

ondas de superfície



Magnitude e Intensidade

A quantificação de um terremoto pode ser feita em termos de sua *magnitude* e *intensidade*.

Magnitude → Medida instrumental quantitativa, representa a energia liberada pelo sismo.

Intensidade → Medida não instrumental qualitativa, quantifica o impacto local causado pelo sismo na população, em estruturas e no terreno.

Escalas de Magnitude

Quantificam a energia liberada, sendo uma medida quantitativa do sismo. A medida é feita com base na amplitude máxima das ondas de volume ou de superfície.
Existem vária escalas de magnitude. A primeira foi apresentada por Charles Richter em 1930 (Escala Richter).

Magnitude Local ou Richter (M_L)

Calculada como o logaritmo decimal da amplitude máxima do registro sísmico, em mícrons, a uma distância de 100 km do epicentro do sismo. Sismos com magnitude $M_L > 5.0$ são potencialmente muito destrutivos

Magnitude de Volume ou Corpo (m_b) – (body wave magnitude)

Mede a amplitude das ondas primárias (onda P) com período de cerca de 1.0 s e comprimento de onda menor que 10 km. Adequada para terremotos profundos com poucas ondas de superfície e com epicentro distante menos que 600 km do local de observação.

Magnitude de Superfície (M_S) – (surface wave magnitude)

Mede a amplitude das ondas de superfície (ondas L e R) com períodos de 20s e comprimento de onda de 60km. Adequada para sismos distantes mais que 2000km do local de observação. Geralmente é utilizada para grandes terremotos.

Magnitude de Momento (M_w) – (moment magnitude)

Contabiliza a deformação na falha não estando relacionada a nenhum comprimento de onda.

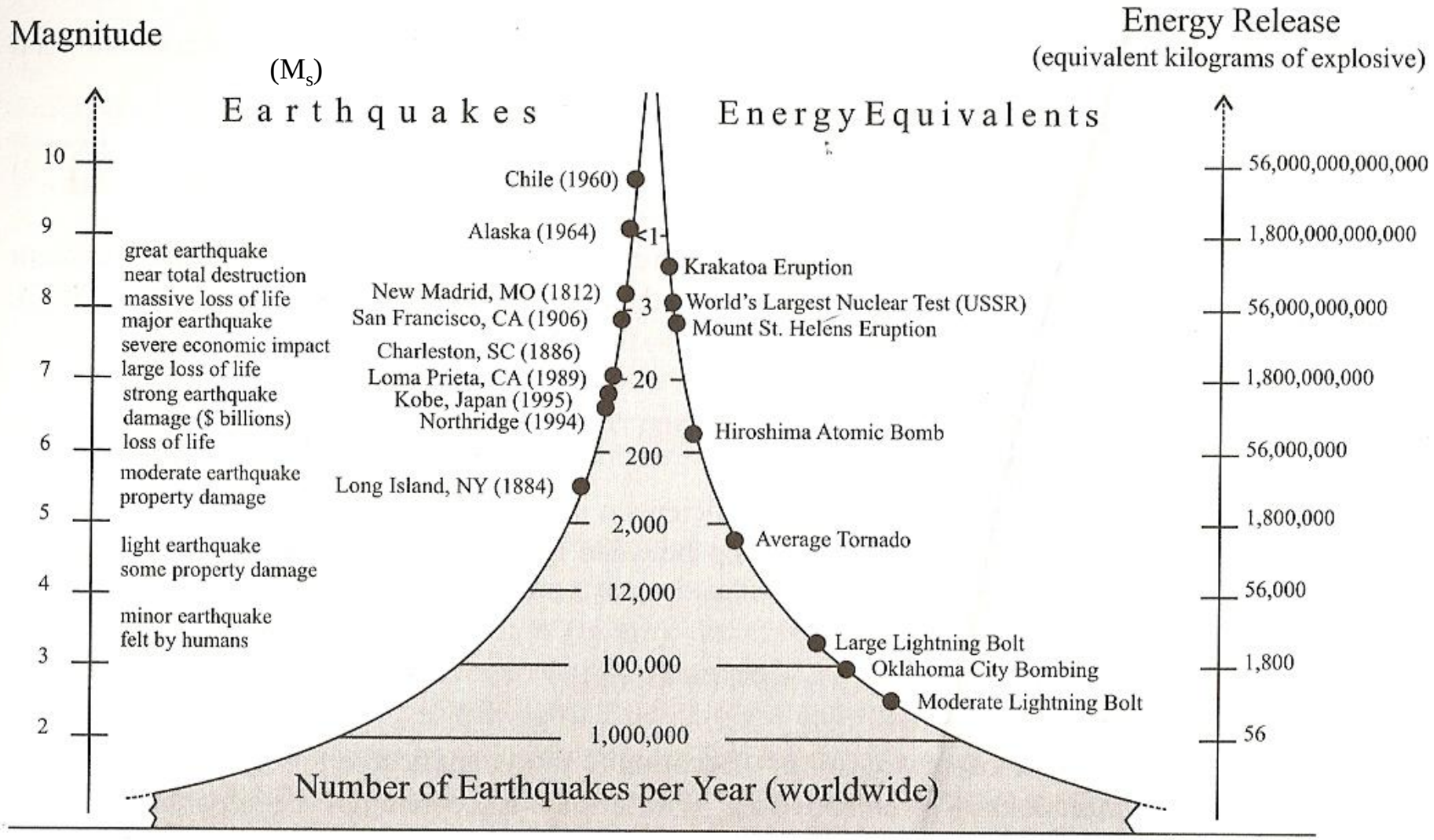
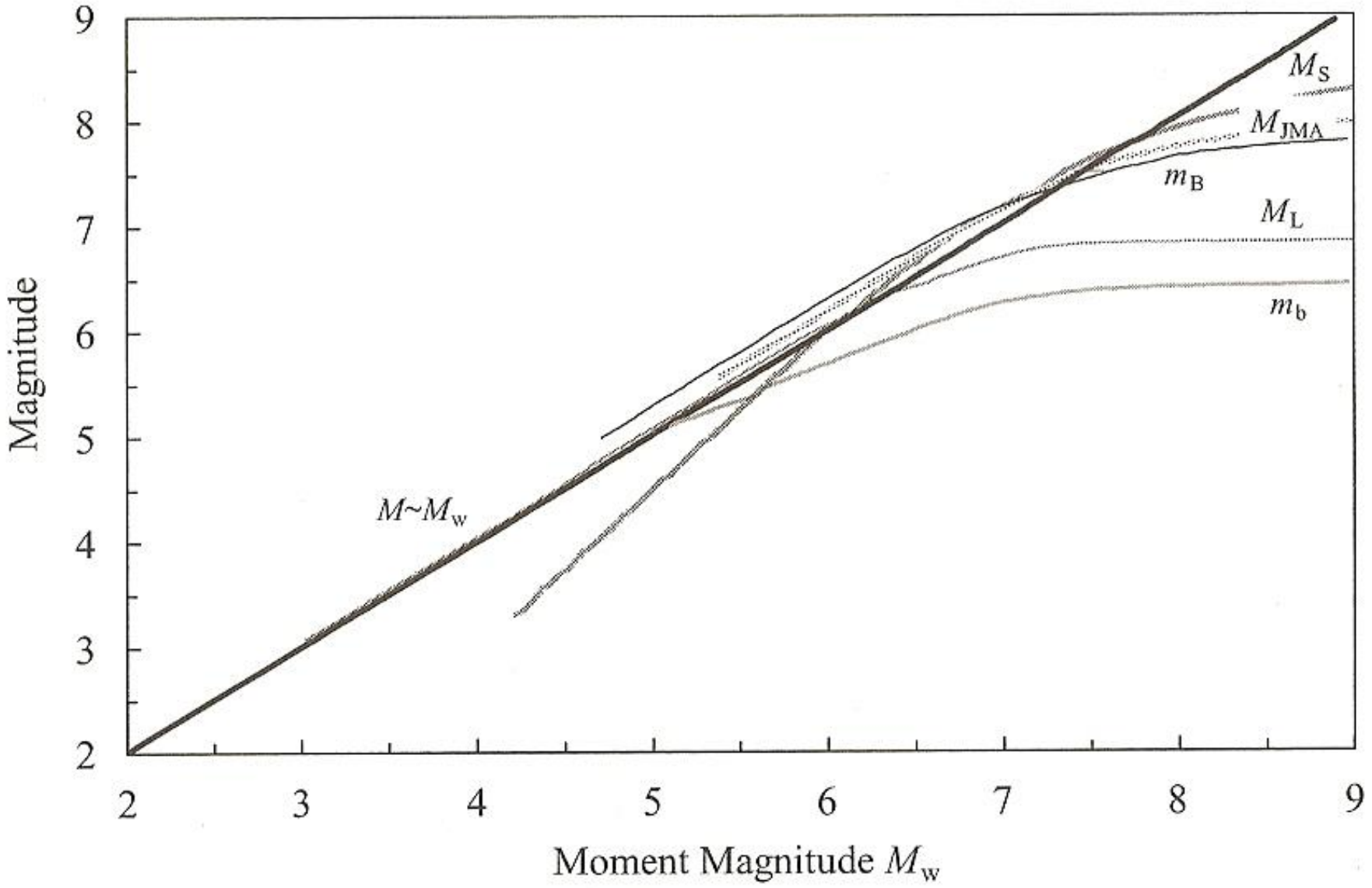


Figure 1.16 Correlation between magnitude and energy release (*adapted from* Bolt, 1999)



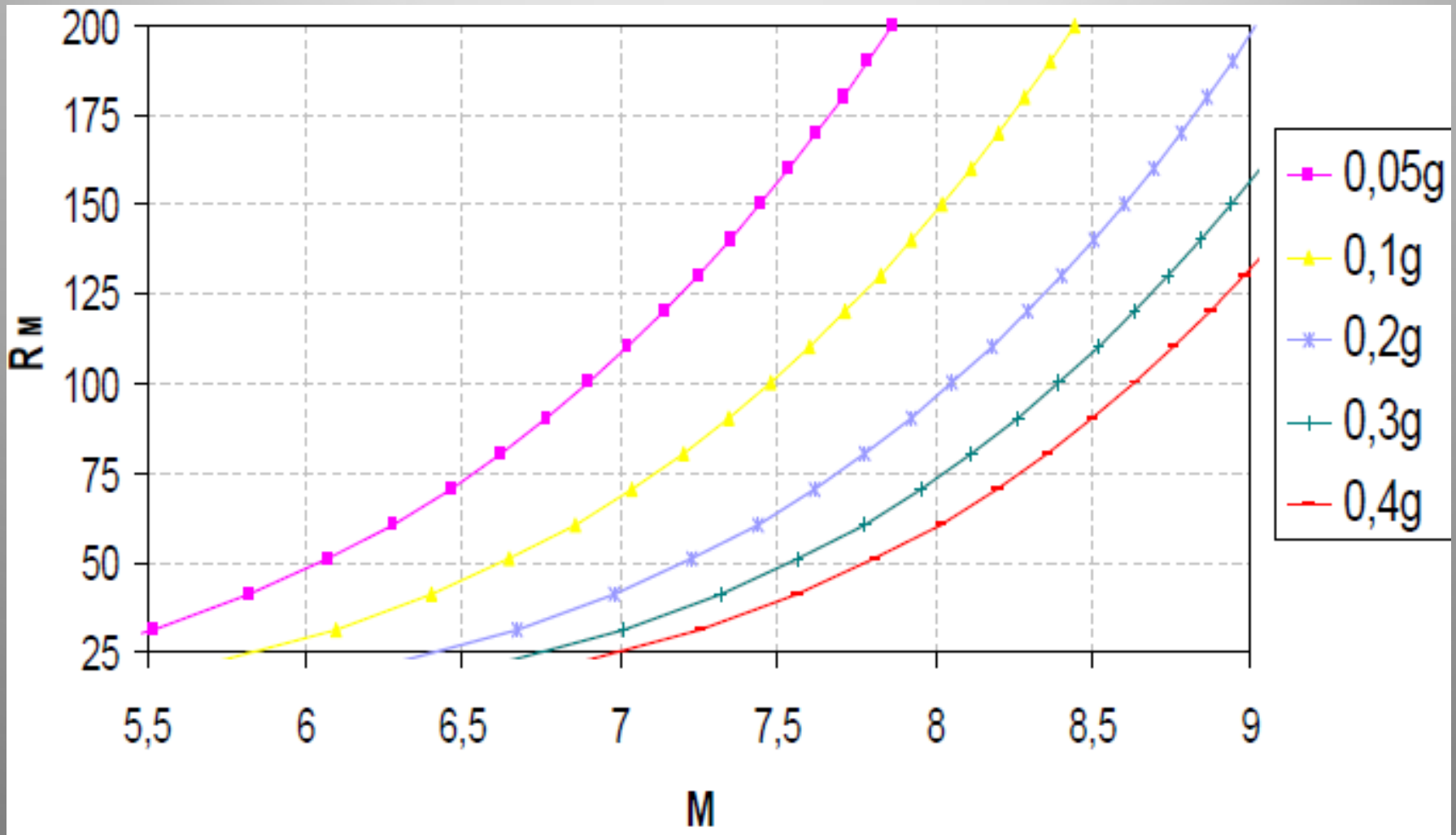
Correlação de escalas de magnitude

Intensidade - Escala Mercali Modificada (MM)

Intensidade	Descrição
I	Imperceptível para as pessoas. Corresponde aos efeitos secundários e de componentes de período longo de grandes terremotos.
II	Sentido por pessoas em repouso, em andares altos ou em locais muito favoráveis para isto.
III	Sentido no interior de edificações. Objetos suspensos balançam. Vibração similar ao tráfego de caminhões leves. A duração pode ser estimada. Pode ser reconhecido como um terremoto.
IV	Objetos suspensos balançam. Vibração similar ao tráfego de caminhões pesados, ou sensação de impacto similar à de uma bola pesada batendo nas paredes. Carros parados balançam. Janelas, pratos e portas vibram. Vidros estalam. Louças se entrechocam. Na faixa superior da intensidade IV, paredes de madeira e pórticos fissuram.
V	Sentido nas ruas; a direção pode ser estimada. Pessoas acordam. Líquidos são perturbados, alguns são derramados. Pequenos objetos instáveis são deslocados ou derrubados. Portas oscilam, fecham e abrem. Venezianas e quadros movem-se. Relógios de pêndulo param, voltam a funcionar ou alteram o seu ritmo.
VI	Sentido por todos. Muitos se assustam e correm para as ruas. As pessoas andam de forma instável. Janelas, pratos e objetos de vidro são quebrados. Pequenos objetos, livros, etc. caem das estantes. Quadros caem das paredes. A mobília é deslocada ou tombada. Reboco e alvenaria fracos apresentam rachaduras. Pequenos sinos (de igrejas e escolas) tocam. Árvores e arbustos movem-se visivelmente.
VII	Difícil manter-se de pé. Notado pelos motoristas. Objetos suspensos oscilam fortemente. A mobília quebra-se. Danos e rachaduras em alvenaria fraca. Queda de reboco; tijolos, pedras, telhas, cornijas, parapeitos não contraventados e ornamentos arquitetônicos soltam-se. Algumas rachaduras em alvenaria normal. Ondas em reservatórios e água turva com lama. Pequenos escorregamentos e formação de cavidades em taludes de areia ou pedregulho. Sinos grandes tocam. Canais de irrigação de concreto danificados.
VIII	Condução de veículos afetada. Danos e colapso parcial em alvenaria comum. Algum dano em alvenaria sólida e nenhum em alvenaria reforçada. Queda de estuque e de algumas paredes de alvenaria. Torção e queda de chaminés, inclusive as de fábricas, monumentos, torres e tanques elevados. Casas em pórtico movem-se em suas fundações, quando não arrancadas do solo. Pilhas de destroços derrubadas. Galhos quebram-se nas árvores. Mudanças na vazão ou temperatura de fontes. Rachaduras em chão úmido ou taludes íngremes.
IX	Pânico geral. Alvenaria fraca destruída; alvenaria comum fortemente danificada, as vezes com colapso total. Alvenaria sólida seriamente danificada. Danos gerais em fundações. Estruturas em pórtico, quando não arrancadas, deslocadas em suas fundações. Pórticos rachados. Rachaduras significativas no solo. Em áreas de aluvião, areia e lama arrastadas; criam-se minas d'água e crateras na areia.
X	A maioria das alvenarias e estruturas em pórtico destruídas com suas fundações. Algumas estruturas de madeira bem construídas e pontes destruídas. Danos sérios em barragens, diques e taludes. Grandes deslizamentos de terra. Água lançada nas margens de canais, rios, lagos, etc. e lama lançada horizontalmente em praias e terrenos planos. Trilhos ligeiramente entortados.
XI	Trilhos bastante entortados. Tubulações subterrâneas completamente fora de serviço.
XII	Destruição praticamente total. Grandes massas de rocha deslocadas. Linhas de visão e nível distorcidas. Objetos lançados no ar.

Modelos de Atenuação

São expressões dando a aceleração máxima do terreno (PGA - Peak Ground Acceleration), variando com a magnitude e a distância do local ao ponto de origem do sismo, pela perda de energia no trajeto.

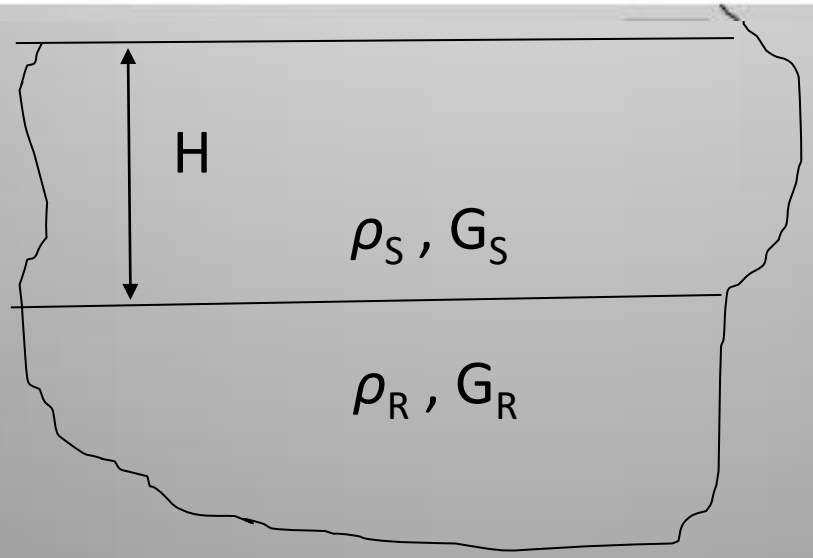


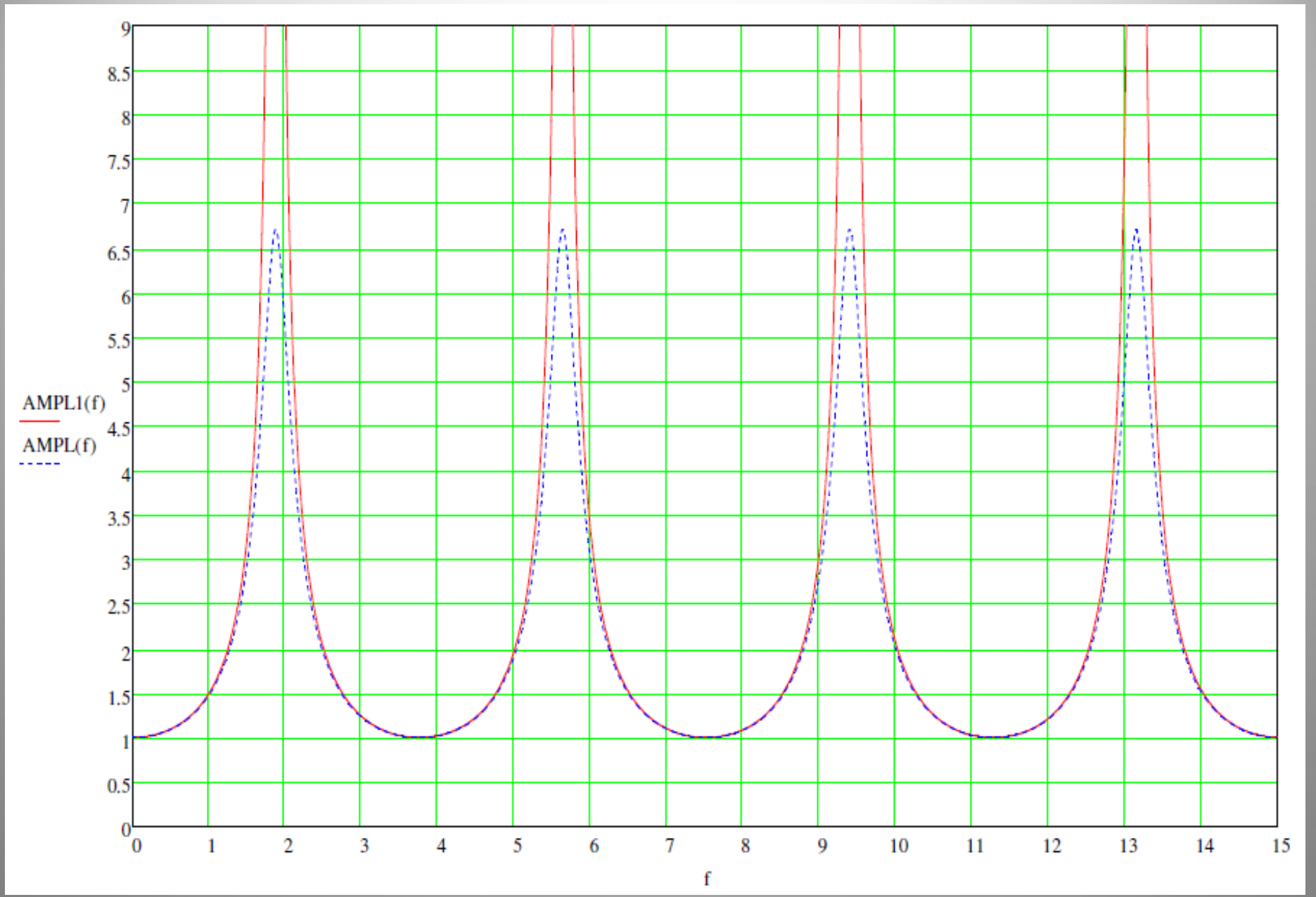
AMPLIFICAÇÃO SÍSMICA NO SOLO

O sismo é amplificado nas frequências próprias do estrato

$$p(f) := 2\cdot\pi\cdot f\cdot\sqrt{\frac{\rho s}{Gs}} \qquad \mu := \frac{\rho s\cdot Gs}{\rho r\cdot Gr} \qquad f := 0, 0.01 .. 15$$

$$AMPL(f) := \frac{1}{\sqrt{(\cos(p(f)\cdot h))^2 + \mu^2\cdot(\sin(p(f)\cdot h))^2}} \qquad AMPL1(f) := \frac{1}{\sqrt{(\cos(p(f)\cdot h))^2}}$$




AMPL1(f)
AMPL(f)
9
8.5
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
f

Espectros de resposta
Espectros de projeto

Chile - 2010

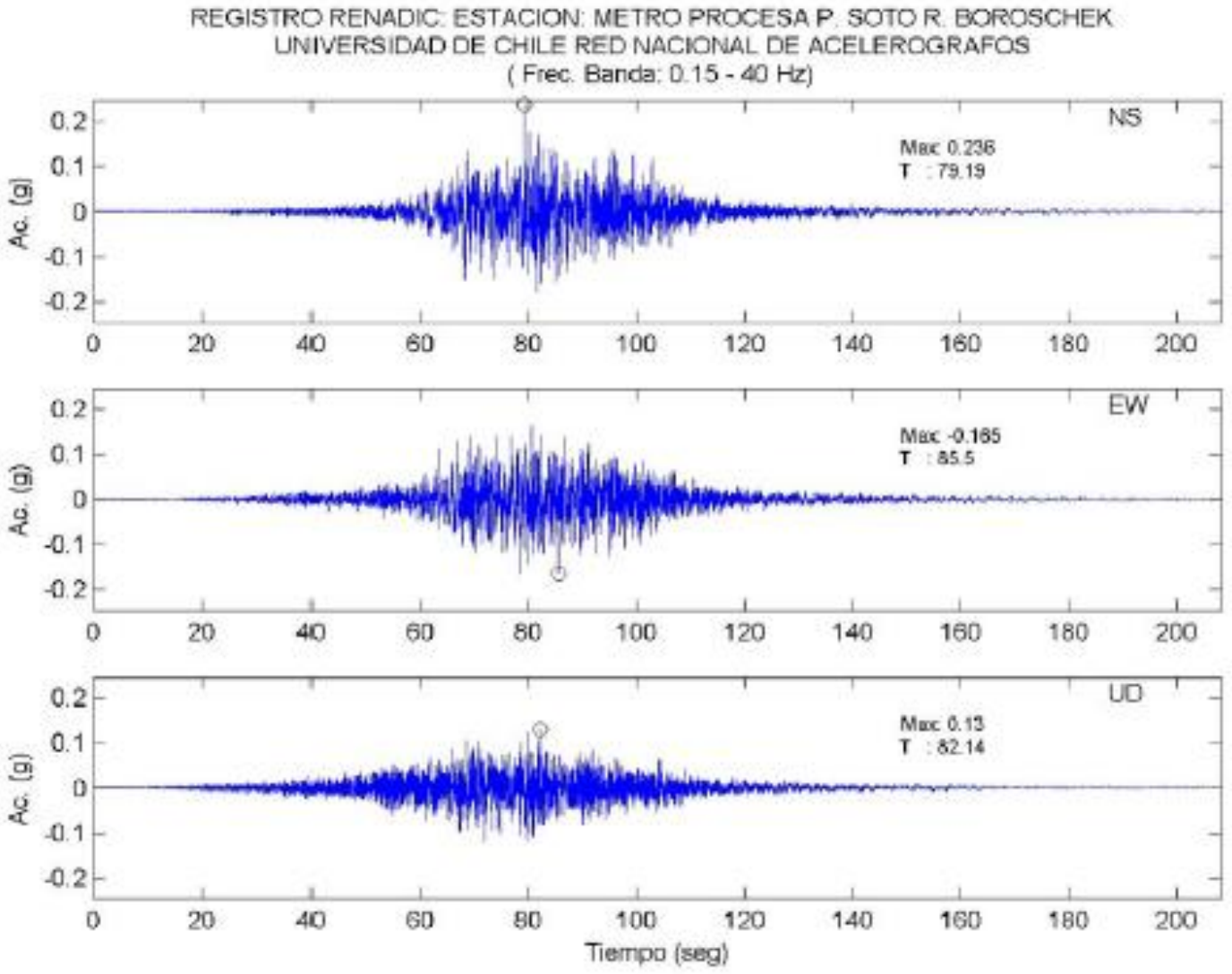
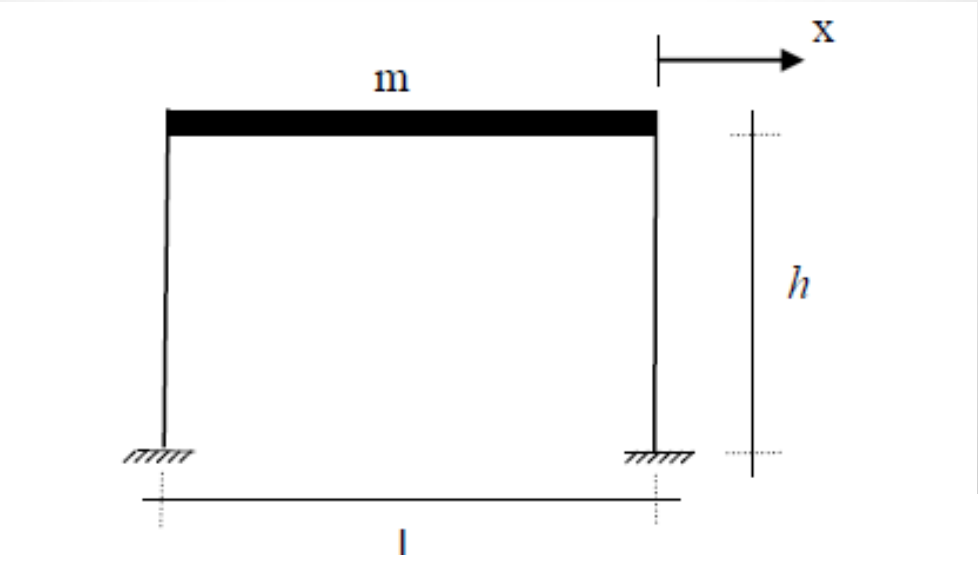
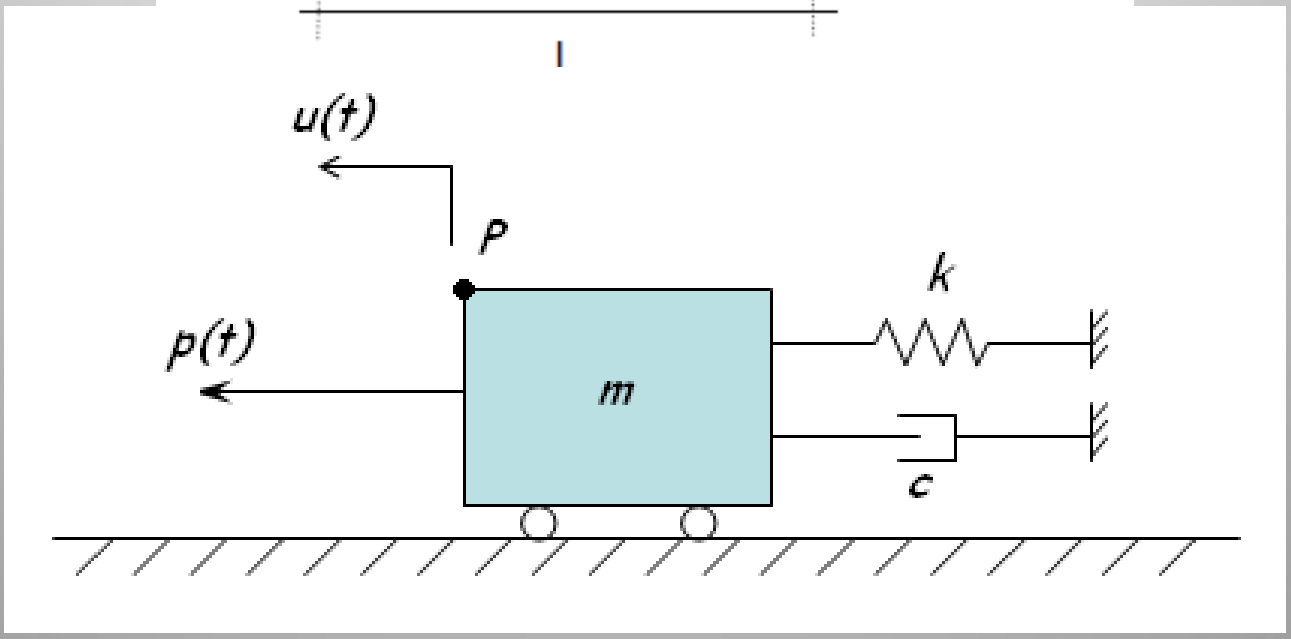


Figura 4 **Registro de Aceleraciones Estación Metro Mirador Santiago.**





$$w = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$f = \frac{w}{2\times\pi} = \frac{1}{2\times\pi}\times\sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{1}{f} = 2\times\pi\times\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\varepsilon = \frac{c}{2\times m\times w} = \frac{c}{2\times\sqrt{m\times k}}$$

$$S_a = \omega^{2}\cdot S_d \qquad S_v = \omega\cdot S_d$$

$$F_{s,\max} = k\cdot S_d = \omega^2.m.S_d = m.S_a$$

Chile - 2010

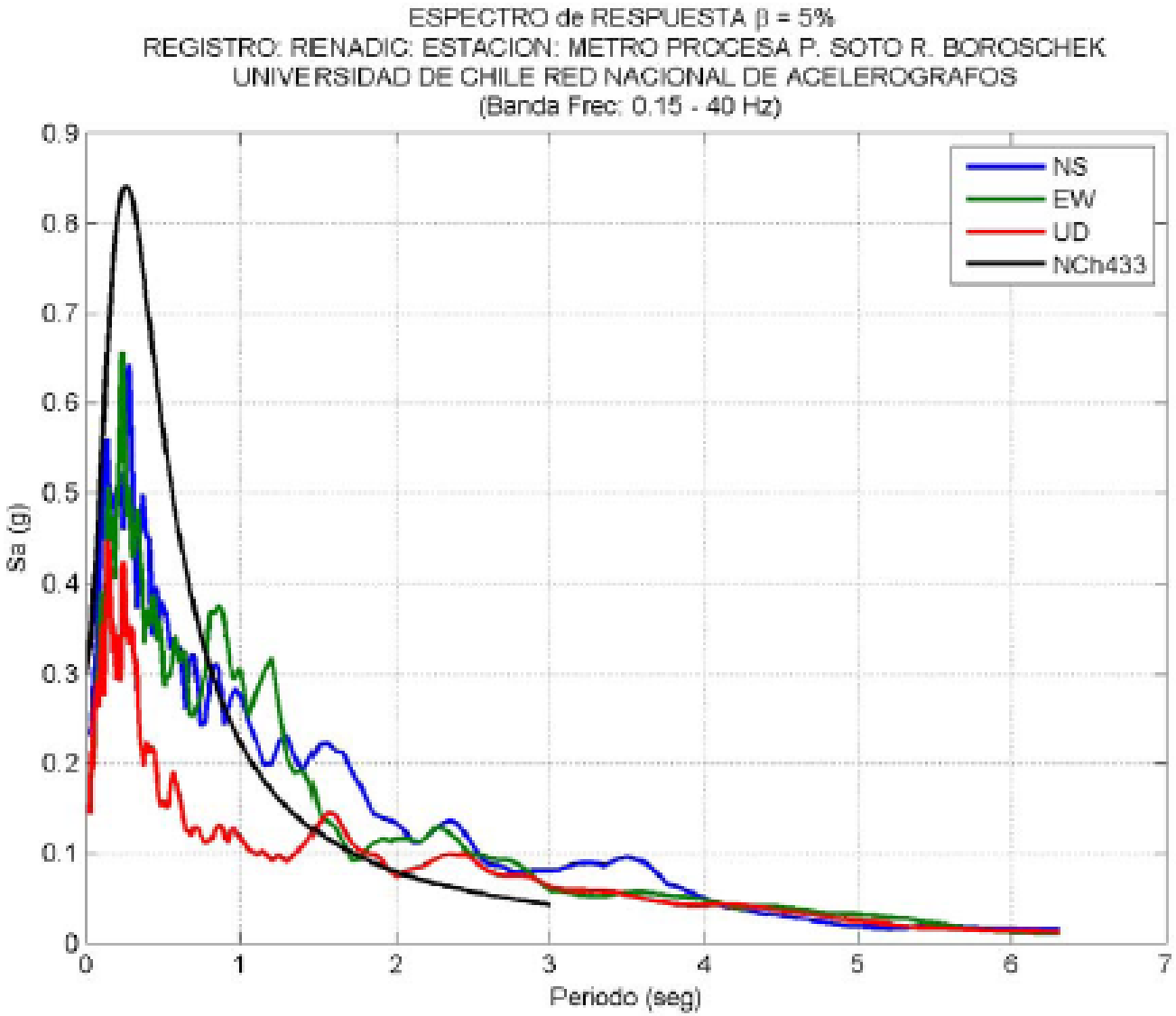
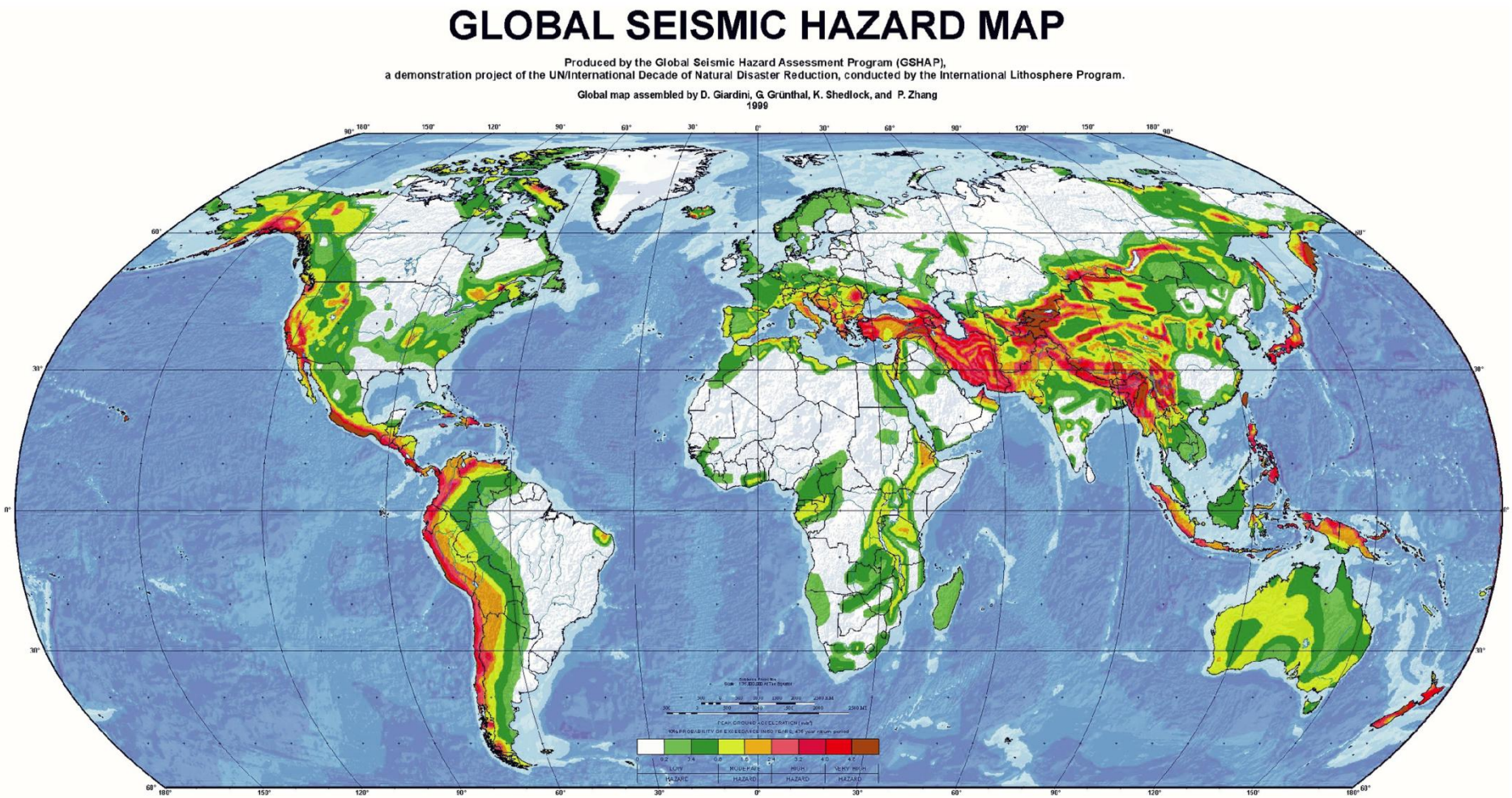


Figura 6 **Comparación Espectro de Diseño Norma Chilena NCh433 – Estación Metro Mirador Santiago.**

Parte III - Sismicidade no Brasil

- O estudo da sismicidade no Brasil começou nos anos 70. Dados sismológicos são coletados em uma rede sismológica em operação contínua. Este estudo da sismicidade no Brasil não foi ainda concluído.
- Um estudo sísmico mundial foi feito (1999) pelo GFZ-POTSDAM, e considerado pelo U.S. Geological Survey ("Seismic Hazard Map of South America").
- O Brasil apresenta sismicidade muito baixa (região intra-placas tectônicas), com acelerações horizontais inferiores a 0,4 m/s^2. Exceções são alguns estados do Nordeste, próximos à falha do Atlântico Central, e a Amazônia Ocidental, próxima à Cordilheira dos Andes.
- Considerando normas de países sul-americanos e a continuidade geográfica entre estes países, foi consolidado o mapa sísmico da América do Sul (período de recorrência de 475 anos).

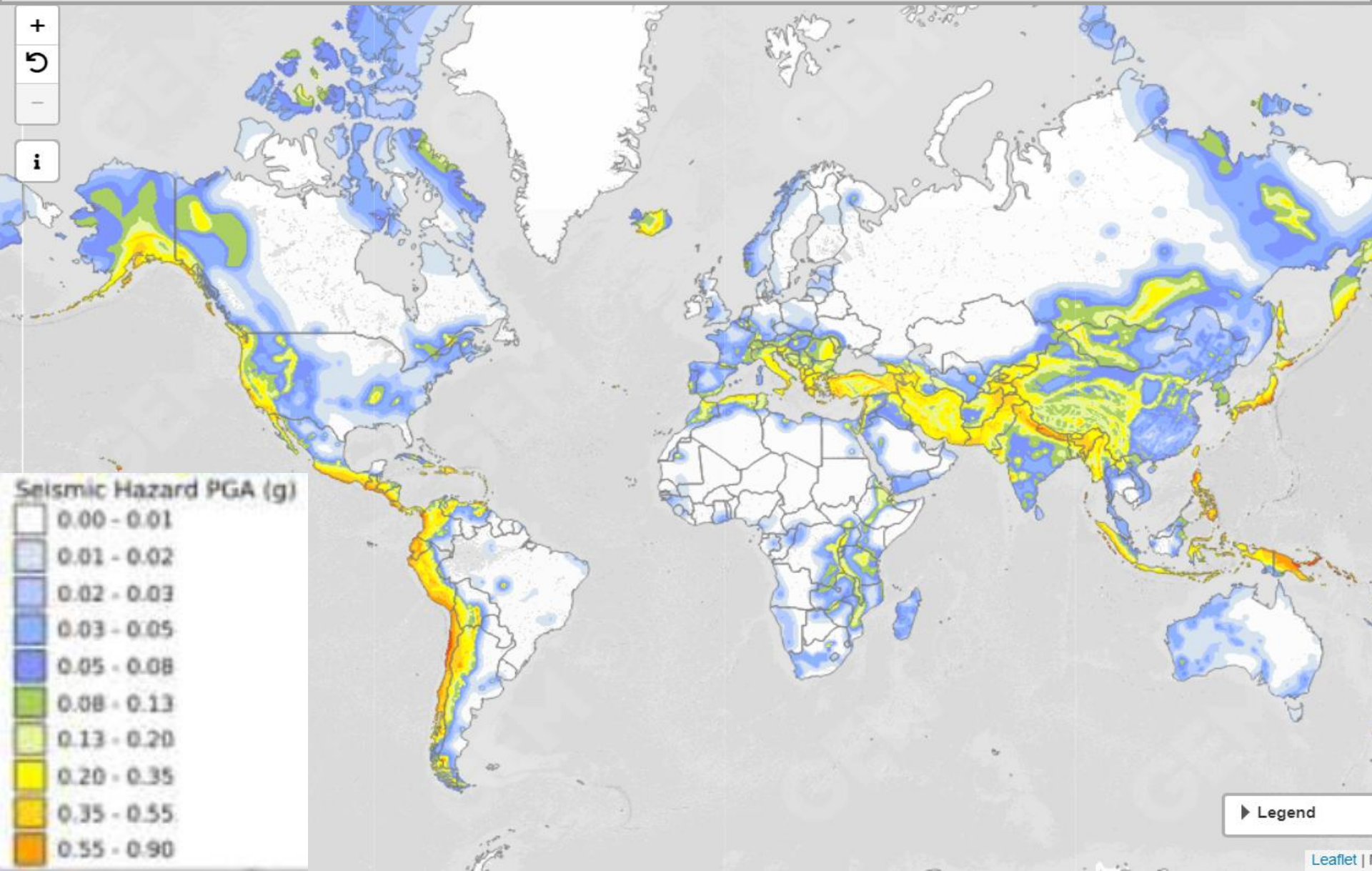
Sismicidade no Mundo

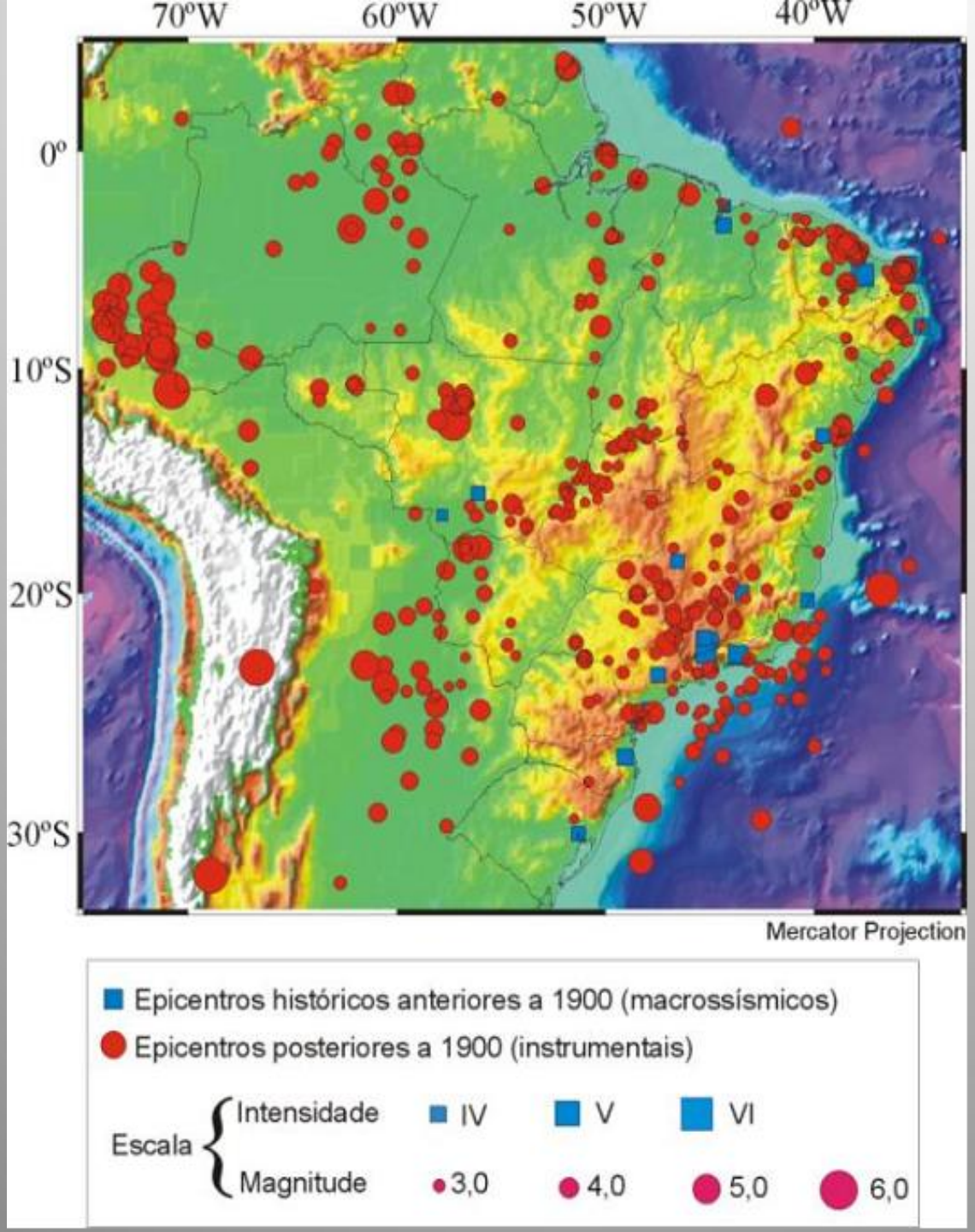


https://media.gfz-potsdam.de/gfz/wv/pic/globalseismichazardmap.png

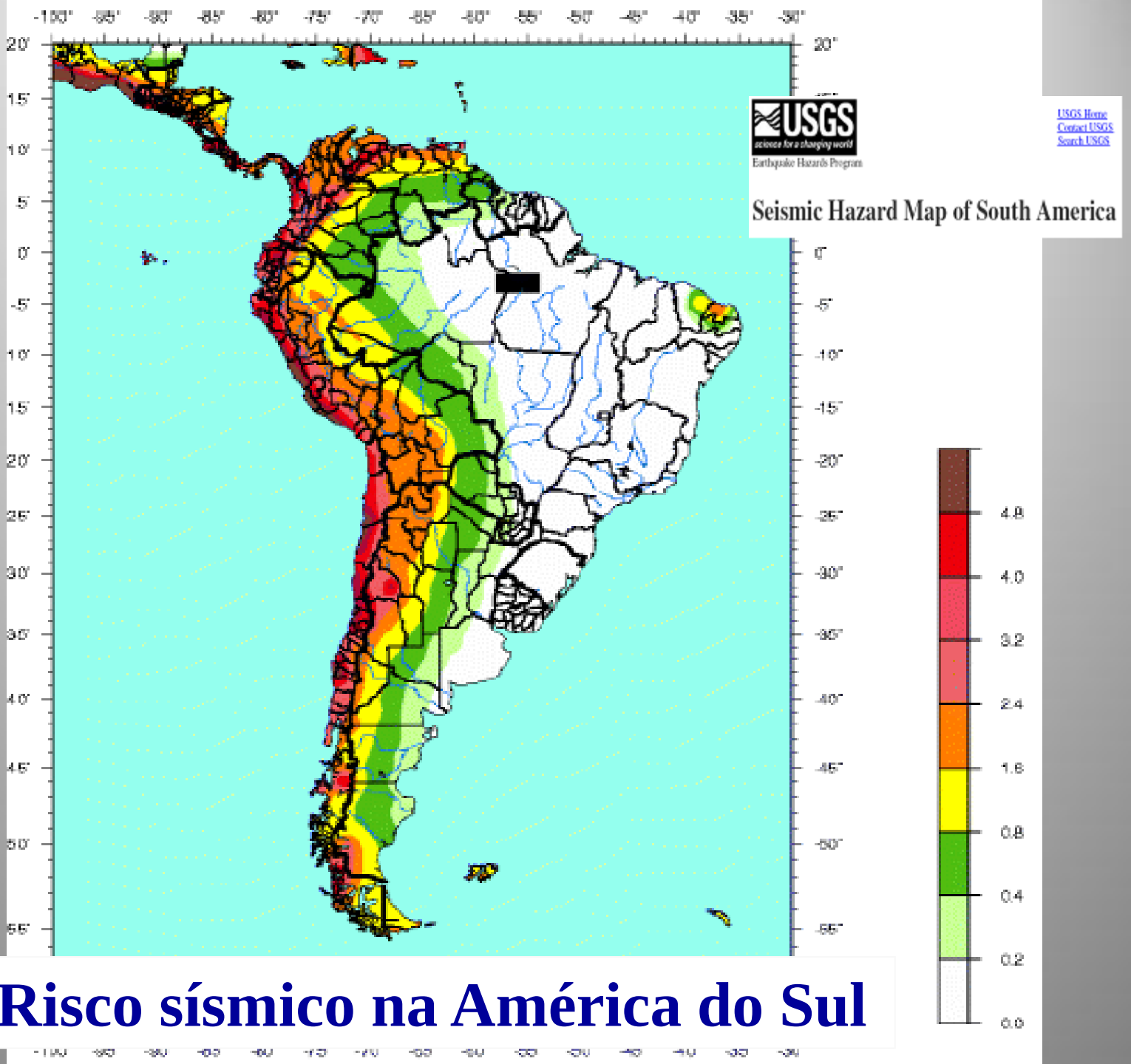
Sismicidade no Mundo

https://maps.openquake.org/map/global-seismic-hazard-map/#2/35.6/16.5



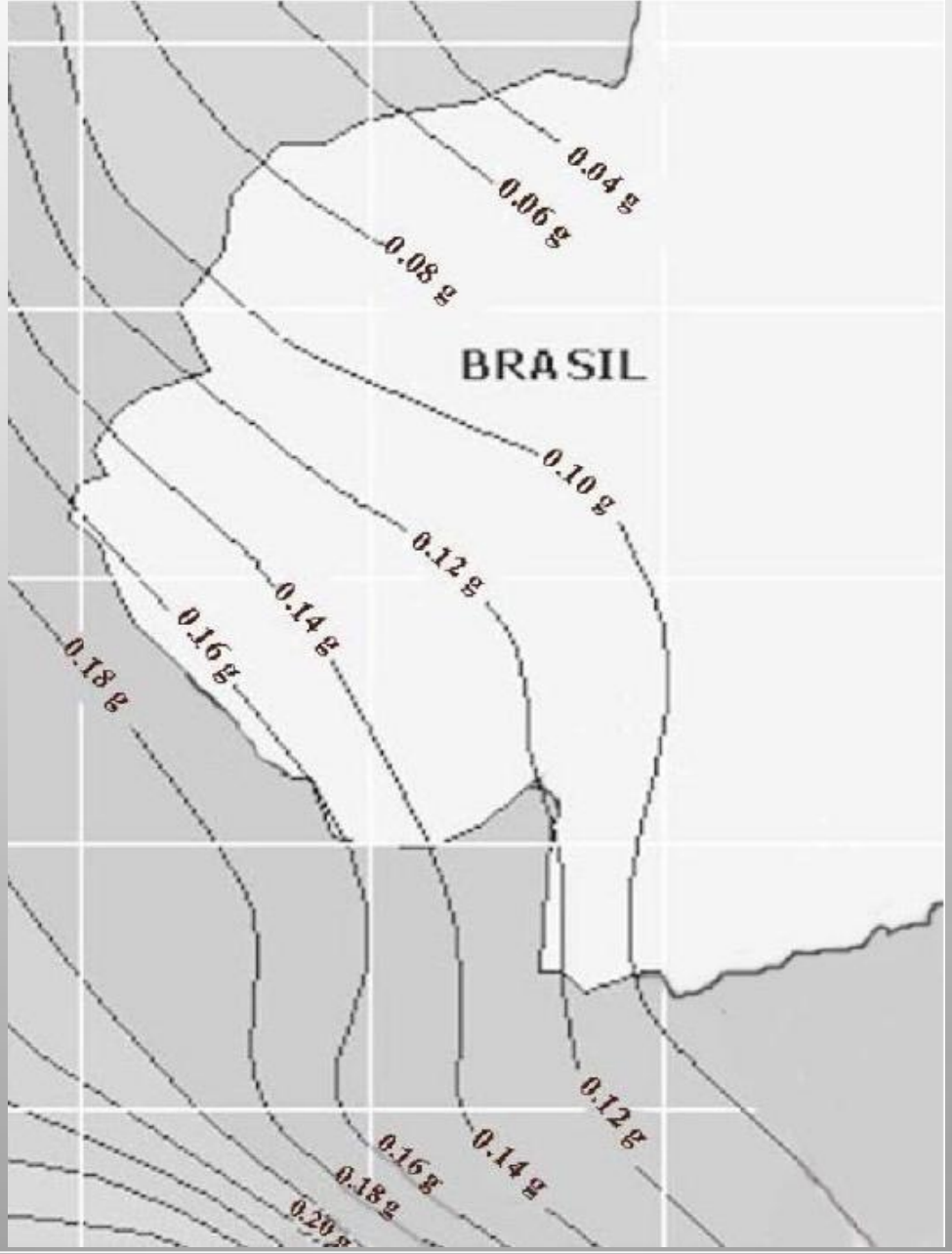


Sismos ocorridos no Brasil

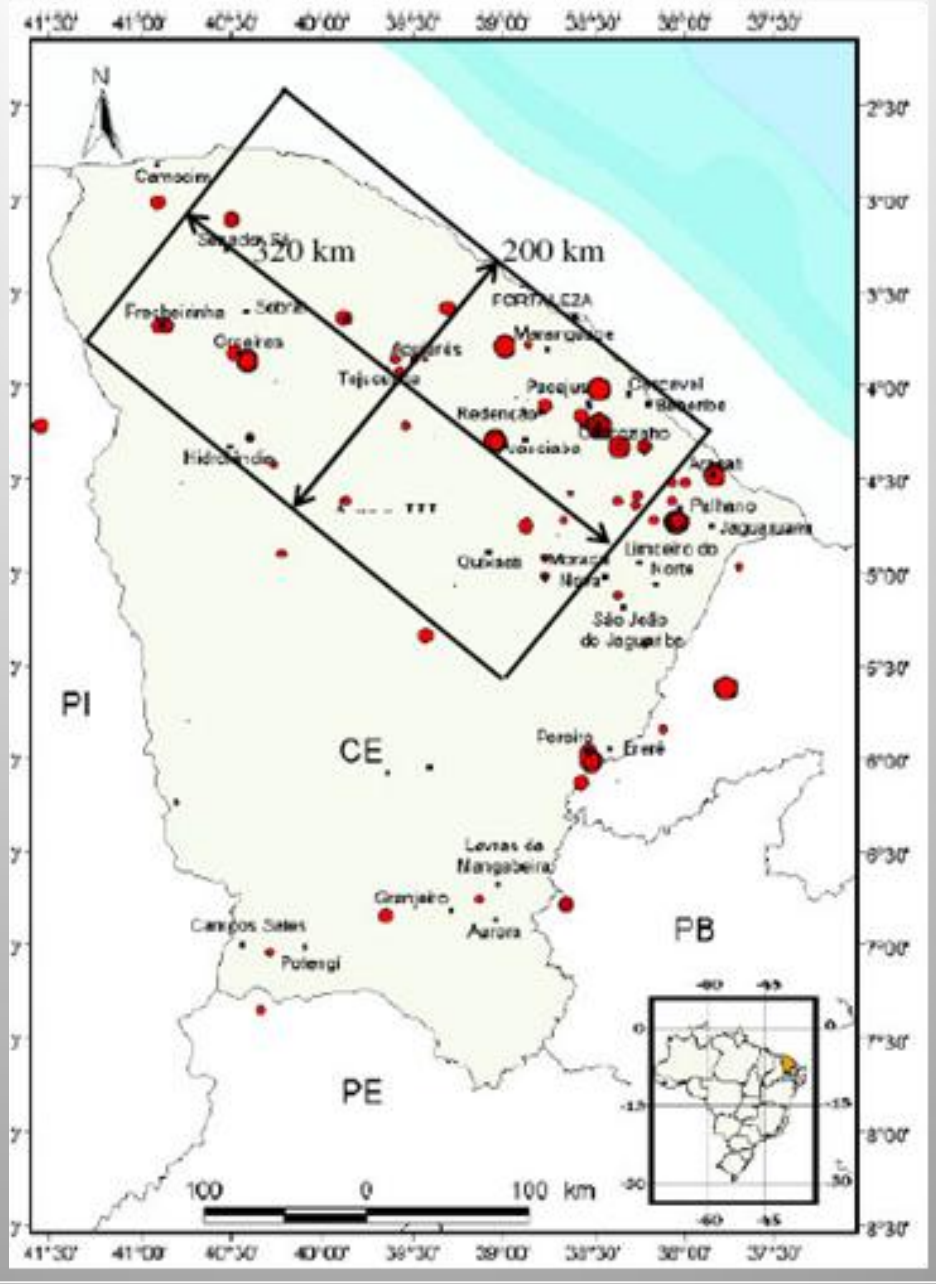


Risco sísmico na América do Sul

Isosistas na América do Sul



Sismicidade na Amazônia (Monroy et al. 2005)



Estudo da sismicidade no Ceará (Marza et al.)

N°	Data	Hora de Origem	Lat.	Long.	Erro	Localidade	UF	I_o	Cat.	Área em	Mag.
	AAAA/MM/DD		(°)	(°)	(km)			(MM)		10^3 km^2	m_b
1	1808/08/08	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	-03,87	-38,92	50	Maranguape	CE	IV	B	70	4,5
6	1928/04/14	21:59	-04,56	-37,76		Aracati	CE	VI	C	10	4,0
7	1968/02/15	10:20:48	-06,09	-38,44	10	Pereiro	CE	VI	B	11	4,1
8	1968/02/23	11:23:02	-06,09	-38,44	5	Pereiro	CE	VII	A	84	4,6
9	1980/11/20	00:29:42	-04,30	-38,40	10	Pacajús	CE	VII	A	1000	5,2
10	1988/03/30	21:36:34	-03,95	-40,34	2	Groaíras	CE	VI-VII	I		4,1
11	1988/10/18	23:15:50	-04,81	-37,98	2	Palhano	CE	VI	I		4,2
12	1988/10/29	00:24:28	-04,81	-37,97	2	Palhano	CE	VI	I		4,1
13	1989/03/25	12:29:21	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,1
14	1989/03/26	10:25:34	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,5
15	1989/05/26	19:55:23	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,1
16	1989/08/28	05:06:23	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,3
17	1989/10/17	12:02:48	-04,81	-37,97	5	Palhano	CE		I		4,2
18	1991/04/19		-03,90	-39,90	20	Taperuaba	CE	VI-VII	I	196	4,8
19	1998/06/04	00:40:46	-04,41	-38,29	2	Cascavel	CE		I		4,0
20	2000/07/04	04:54:47	-04,10	-38,40		Pitombeiras	CE		I		4,1

Listagem dos sismos com $m_b \geq 4,0$ ocorridos na região entre 1808 e 2000

Expressão de Gutemberg-Richter para o Ceará:

$$\log_{10}(\sum N) = 2{,}92 - 1{,}01 \cdot M$$

	M	log(∑N) = 2,92-1,01M	∑N (em 1 ano)	∑N (em 1.000.000 anos)	Intervalos	∑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			

Modelos de Atenuação

Função para o centro e leste americano (Toro e outros - 1997):

GERAL

$$\log(PGA) = C_2 + C_2(M_w - 6)^2 - C_3(\log R_M) + C_4 \max(\log \frac{R_M}{100}, 0) - C_5 R_M$$

PGA

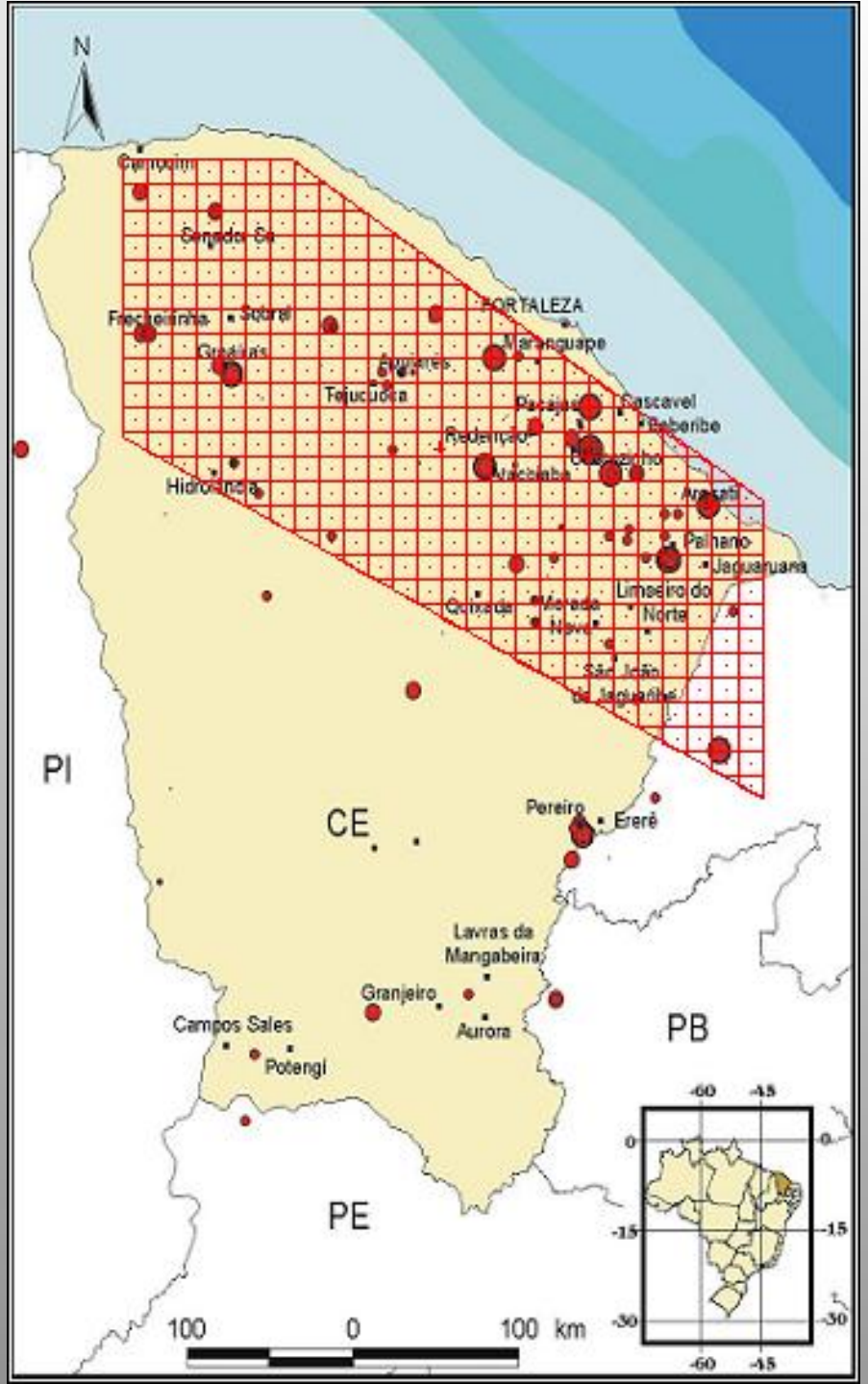
$$\log(\mathrm{PGA}) = 2{,}07 + 1{,}20(\mathrm{M_w} - 6)^2 - 1{,}28(\log \mathrm{R_M}) + 0{,}05 \max(\log \frac{\mathrm{R_M}}{100}, 0) - 0{,}0018\mathrm{R_M}$$

em g's

$$\mathrm{R_M} = \sqrt{\mathrm{d}^2 + 9{,}3^2}$$

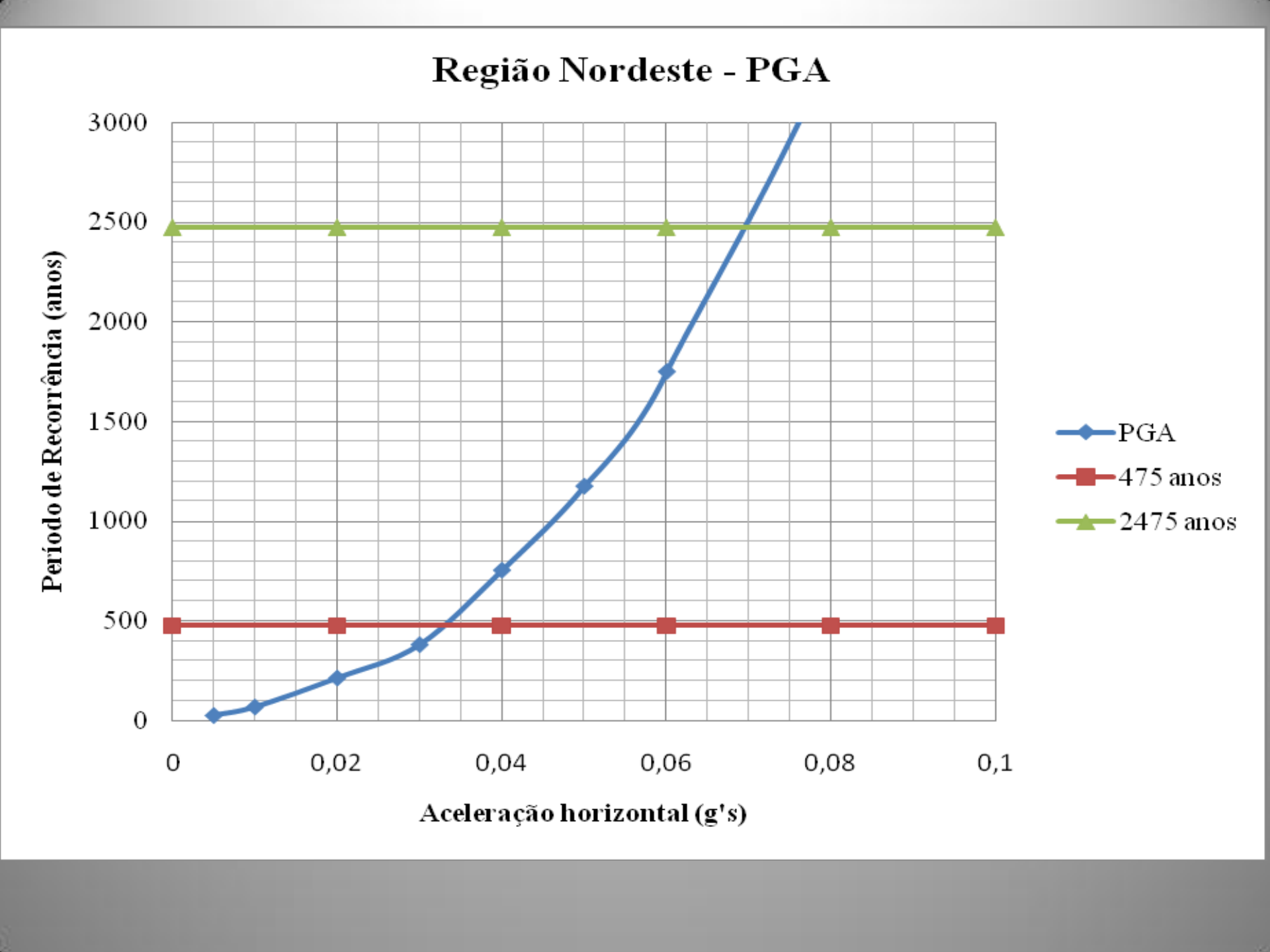
distância ao epicentro (km)

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	3,54	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


N
Camocim
Cenaedo Se
Sobral
Tejucuoca
Pacajus
Cascavel
Redenção
Aracati
Palhano
Jaguaruana
Limoeiro do Norte
Quixadá
Pereiro
Ererê
Lavras da Mangabeira
Granjeiro
Aurora
Campos Sales
Potengi
PI
CE
PB
PE
100 0 100 km

Períodos de Recorrência (PGA) – Região Nordeste

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


Região Nordeste - PGA
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Período de Recorrência (anos)
0
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
Aceleração horizontal (g's)
PGA
475 anos
2475 anos

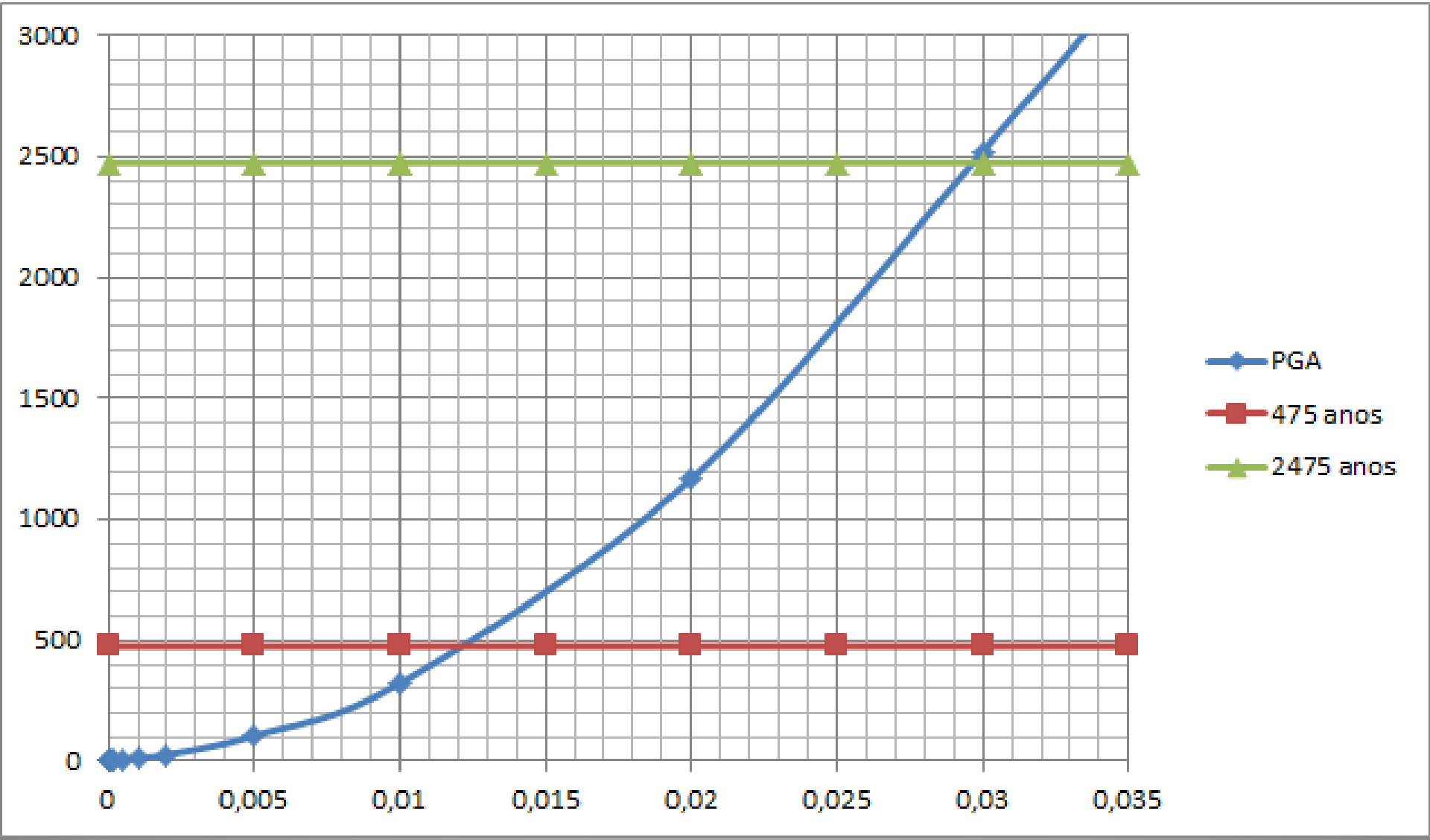
REGIÃO SUDESTE
TRITO
DERAL
Goiânia
GOIÁS
MINAS GERAIS
ESPÍRITO SANTO
Belo Horizonte
Vitória
SÃO PAULO
RIO DE JANEIRO
Rio de Janeiro
São Paulo

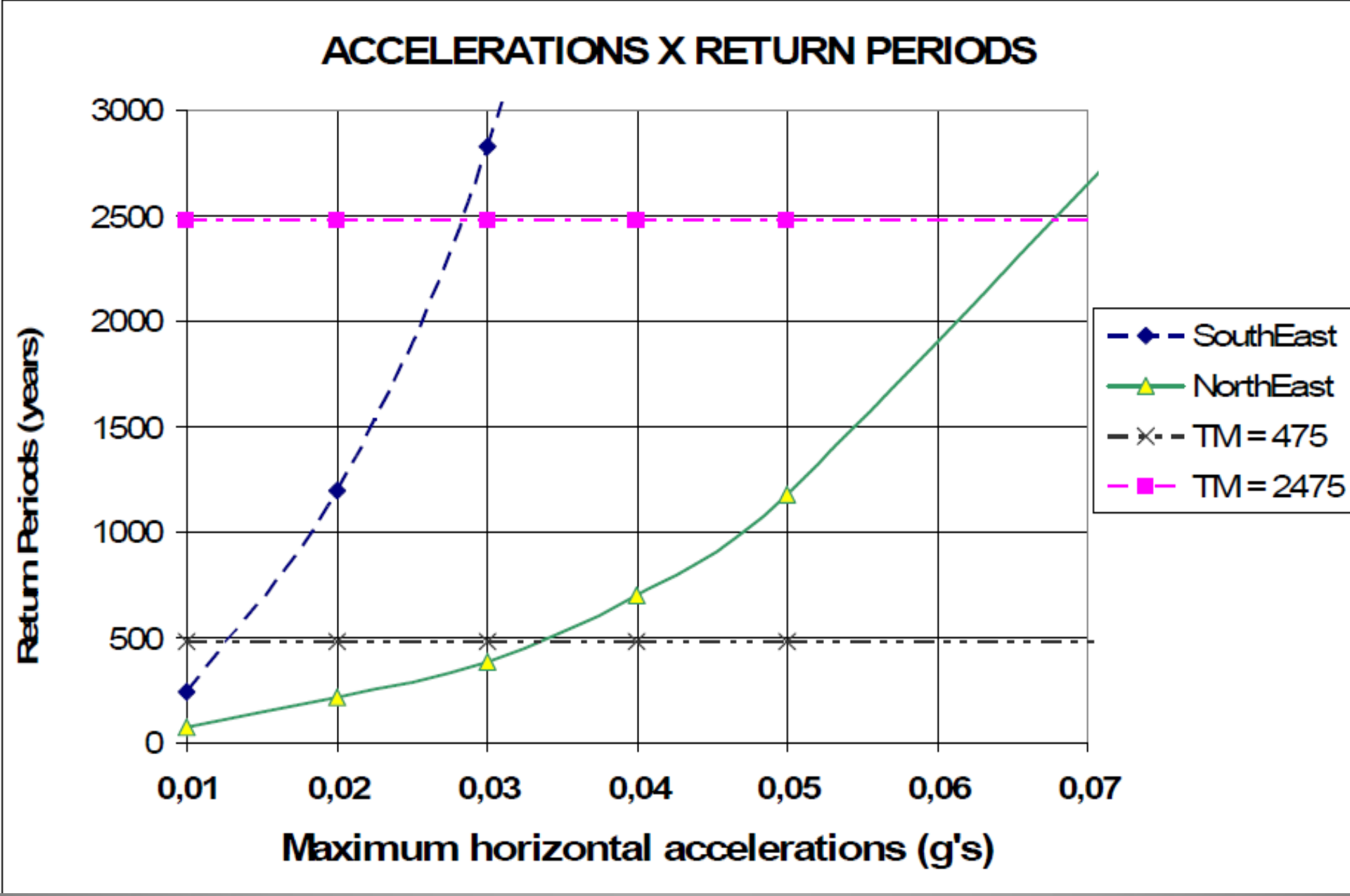
Expressão de Gutemberg-Richter para o Sudeste:

$$log_{10}(\sum N) = 4{,}44 - 1{,}28 \,.\, M$$

	M	log(∑N) = 4,44-1,28M	∑N (em 1 ano)	∑N (em 1.000.000 anos)	Intervalos	∑N (intervalos)	Cada sub-região (/313)
M≥3,5	3,5	-0,04	0,912010839	912010,8394			
					3,5 ≤ M ≤ 4,0	703081,2263	2246,2659
M≥4,0	4,0	-0,68	0,208929613	208929,6131			
					4,0 ≤ M ≤ 4,5	161066,6039	514,5898
M≥4,5	4,5	-1,32	0,047863009	47863,0092			
					4,5 ≤ M ≤ 5,0	36898,2273	117,8857
M≥5,0	5,0	-1,96	0,010964782	10964,7820			
					5,0 ≤ M ≤ 5,5	8452,8955	27,0061
M≥5,5	5,5	-2,6	0,002511886	2511,8864			
					5,5 ≤ M ≤ 6,0	1936,4465	6,1867
M≥6,0	6,0	-3,24	0,00057544	575,4399			
					6,0 ≤ M ≤ 6,5	443,6143	1,4173
M≥6,5	6,5	-3,88	0,000131826	131,8257			
					6,5 ≤ M ≤ 7,0	101,6262	0,3247
M≥7,0	7,0	-4,52	3,01995E-05	30,1995			

REGIÃO SUDESTE - PGA




ACCELERATIONS X RETURN PERIODS
Return Periods (years)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
Maximum horizontal accelerations (g's)
SouthEast
NorthEast
TM = 475
TM = 2475

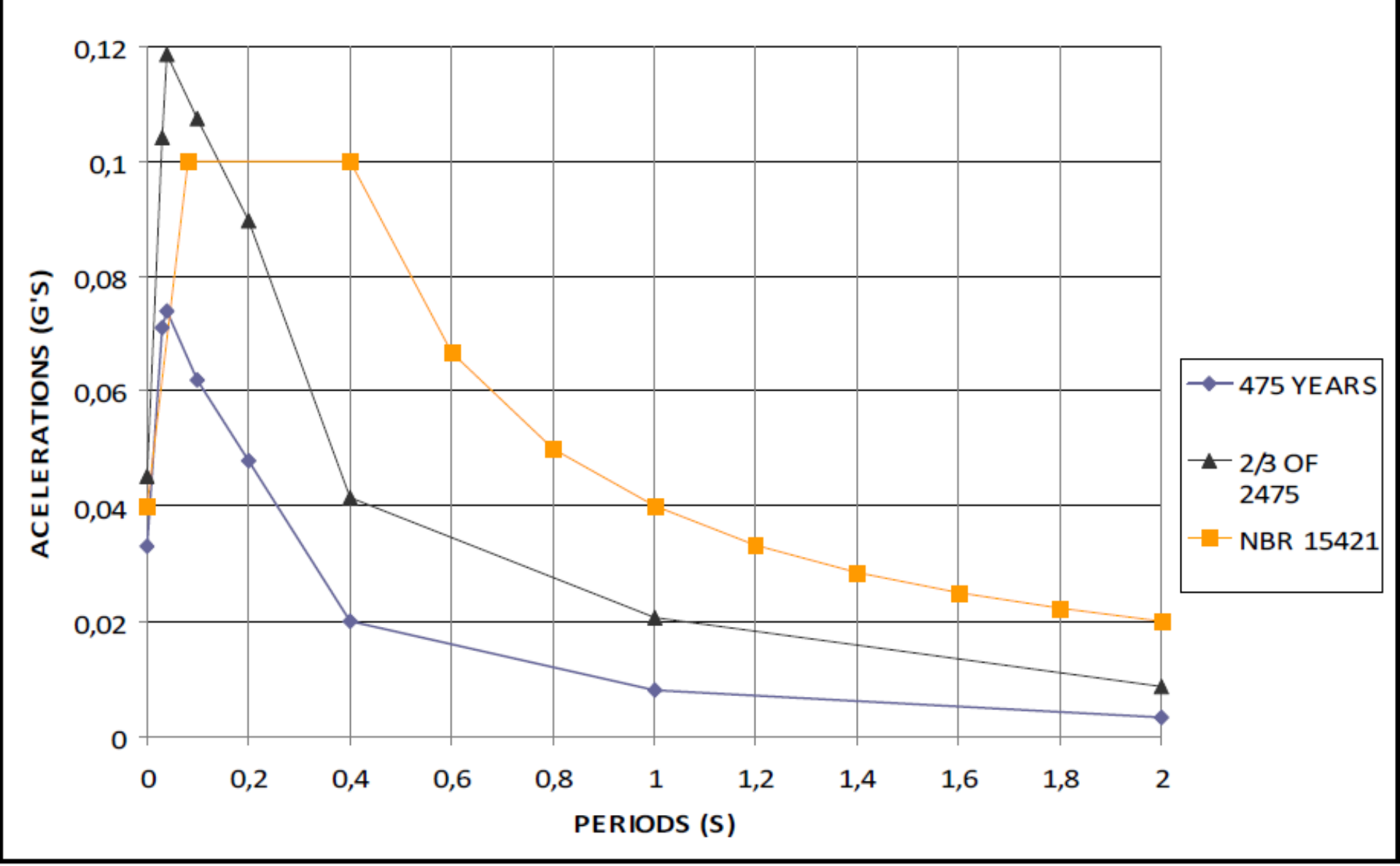


Figure 7. Equal probability spectra for the North-Eastern Region

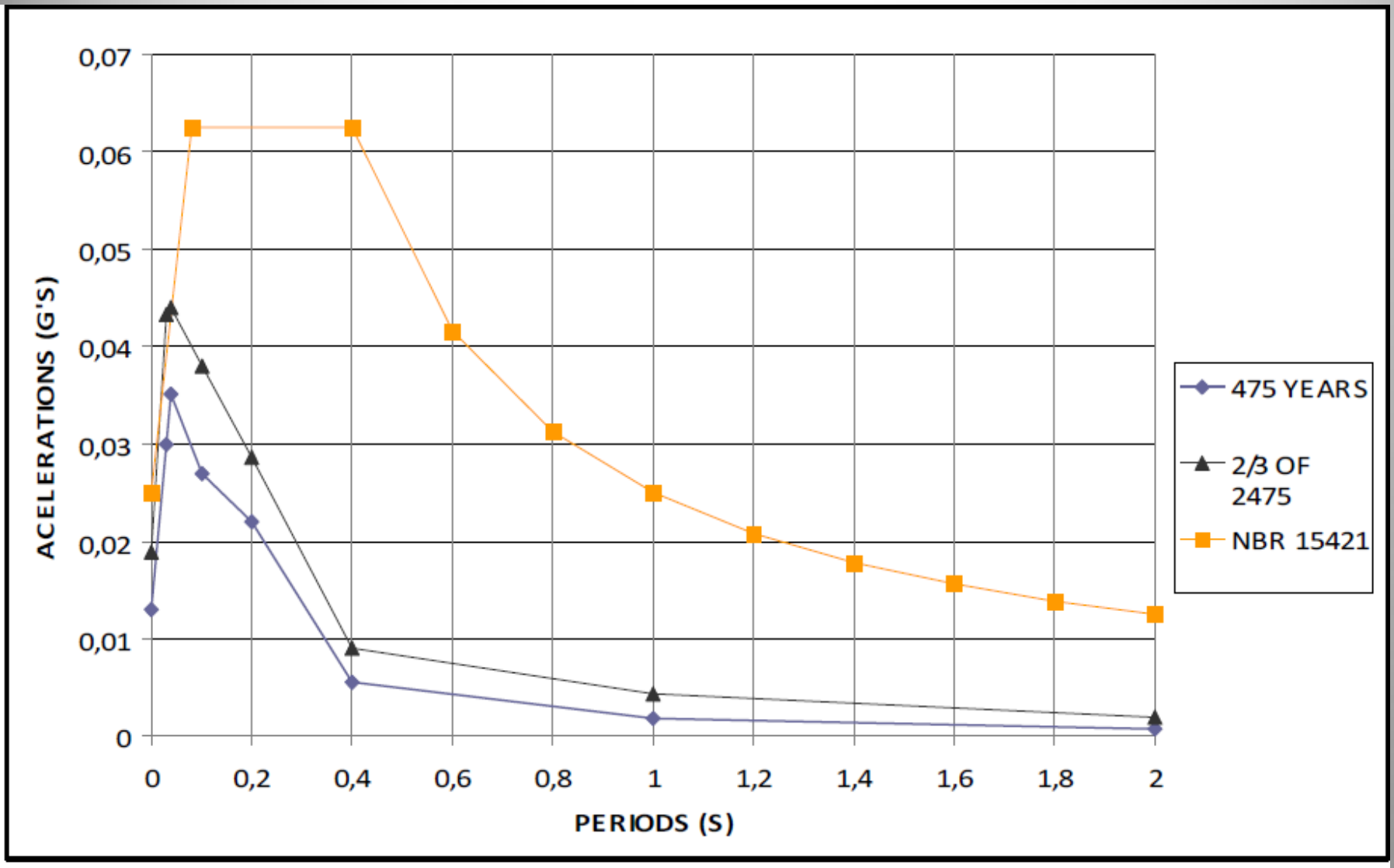
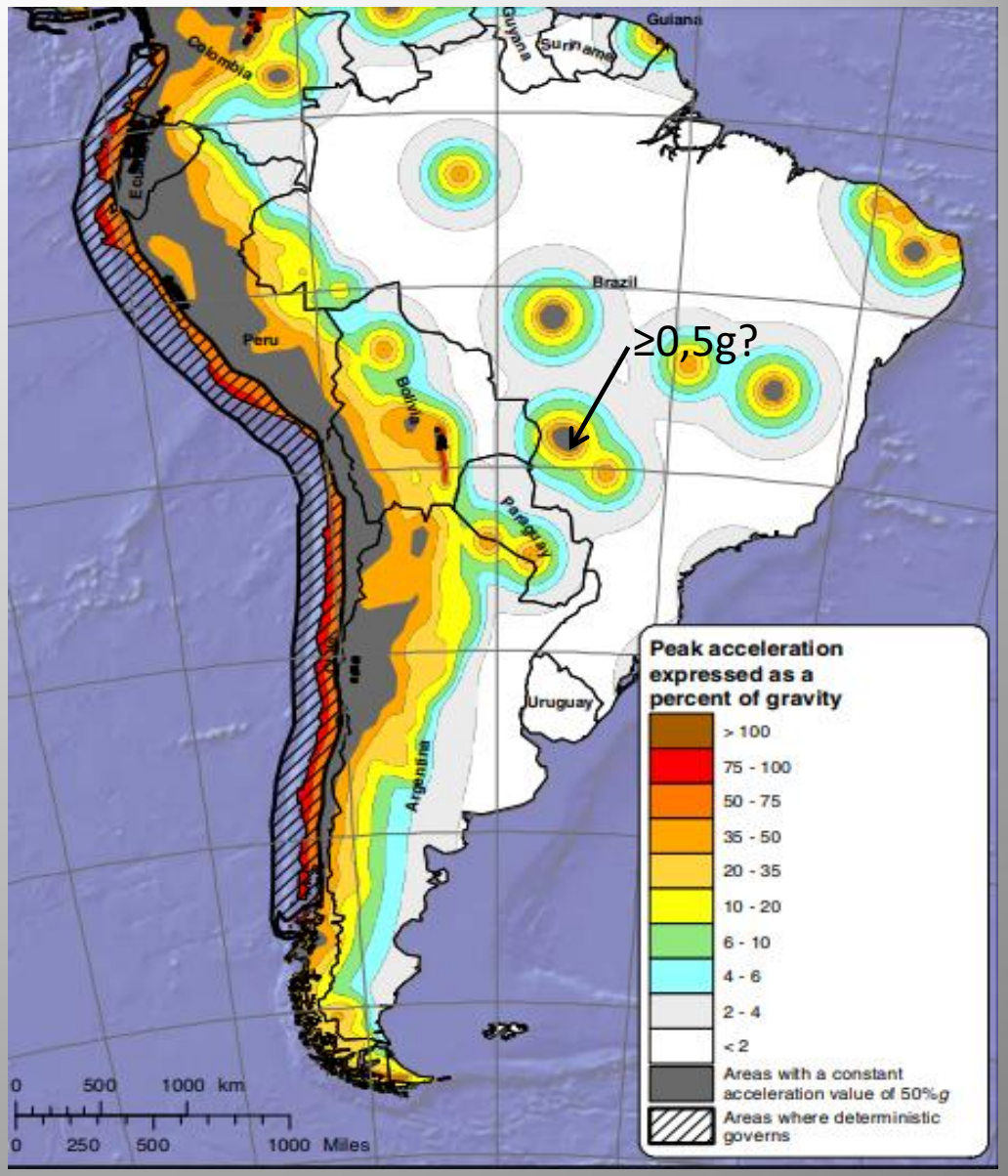


Figure 8. Equal probability spectra for the South-Eastern Region

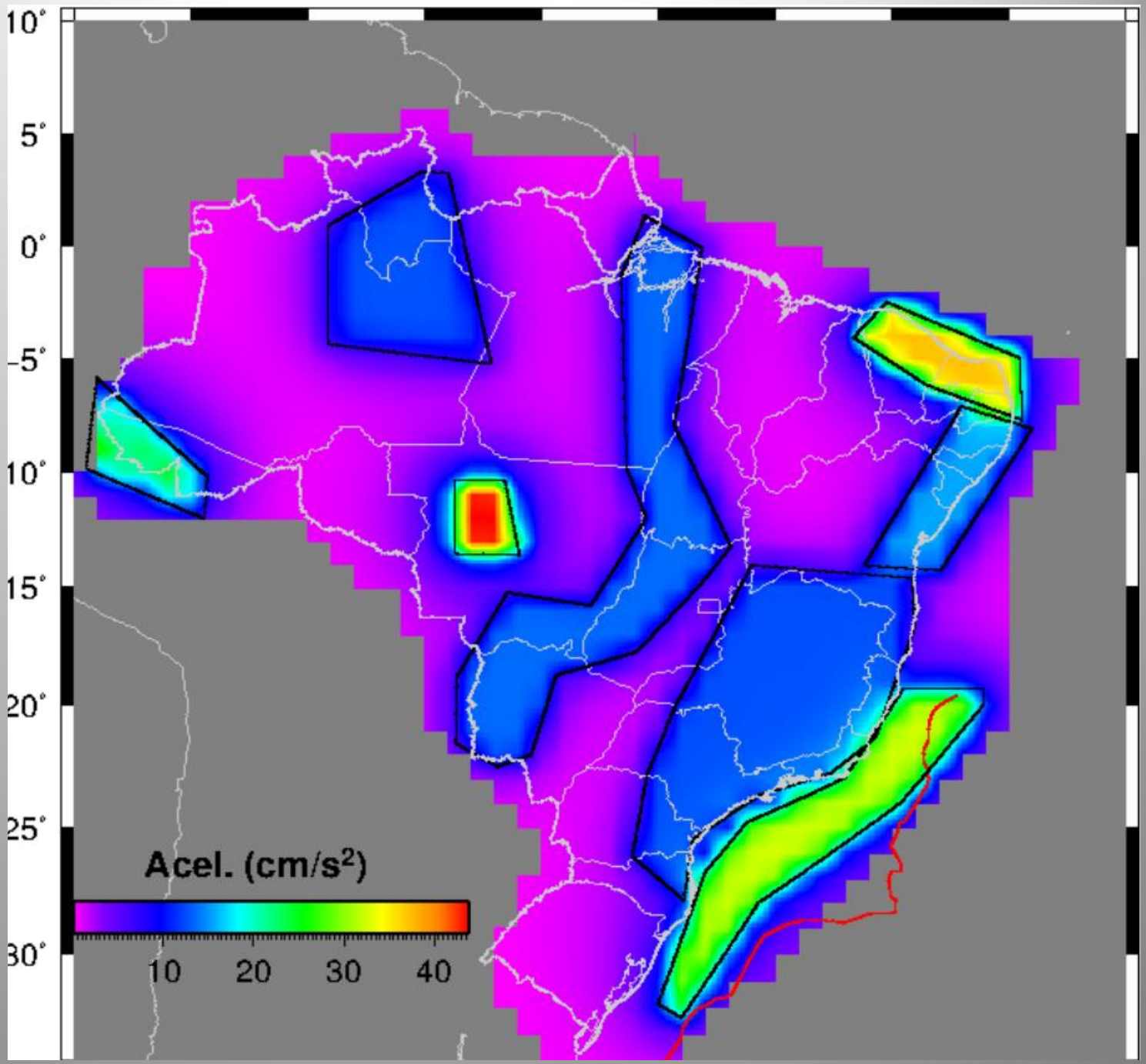
Parte IV – Novos Estudos Sísmicos

Novos estudos para a sismicidade brasileira

PETERSEN M.D., HARMSEN S.C., JAISWAL K.S., RUSKTALES K.S., LUCO N., HALLER K.M., MUELLER C.S., SHUMWAY A.M. ***Seismic Hazard, Risk, and Design for South America***. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 108, pp. 781–800, 2018



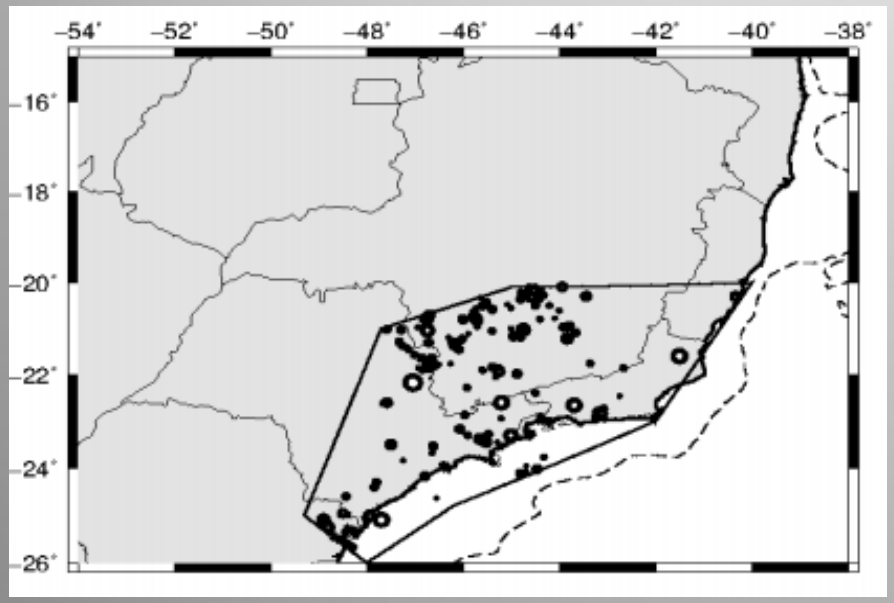
- Dourado (2014)



- Novos dados para o Sudeste (Dourado, 2013)

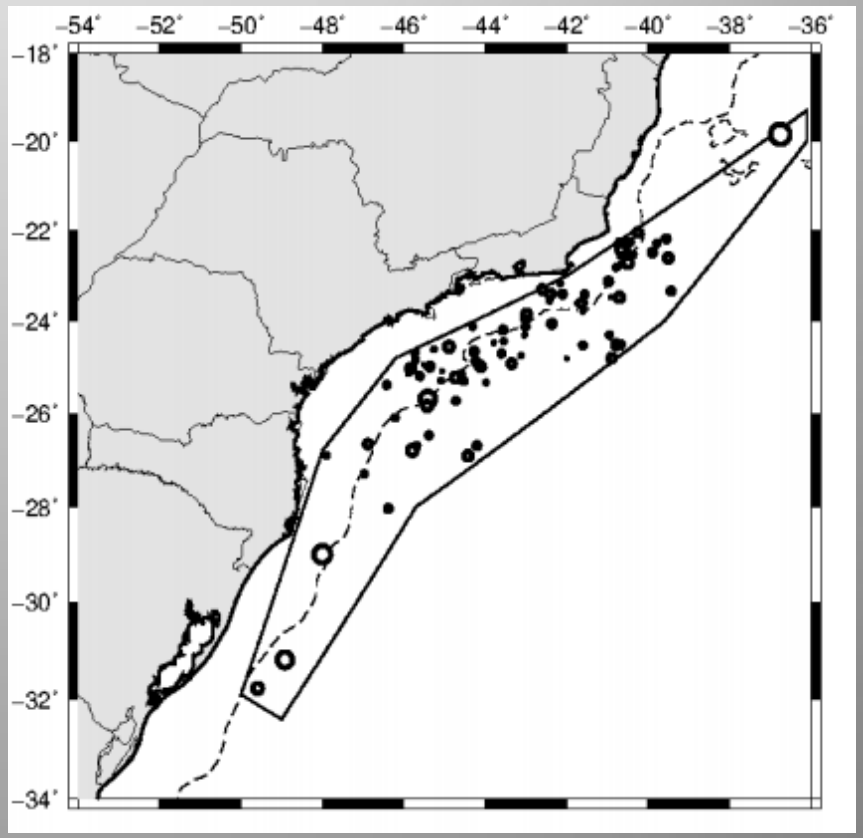
Inshore:

$$log_{10}(\sum N) = 3{,}9969 - 1{,}3113 \cdot M$$

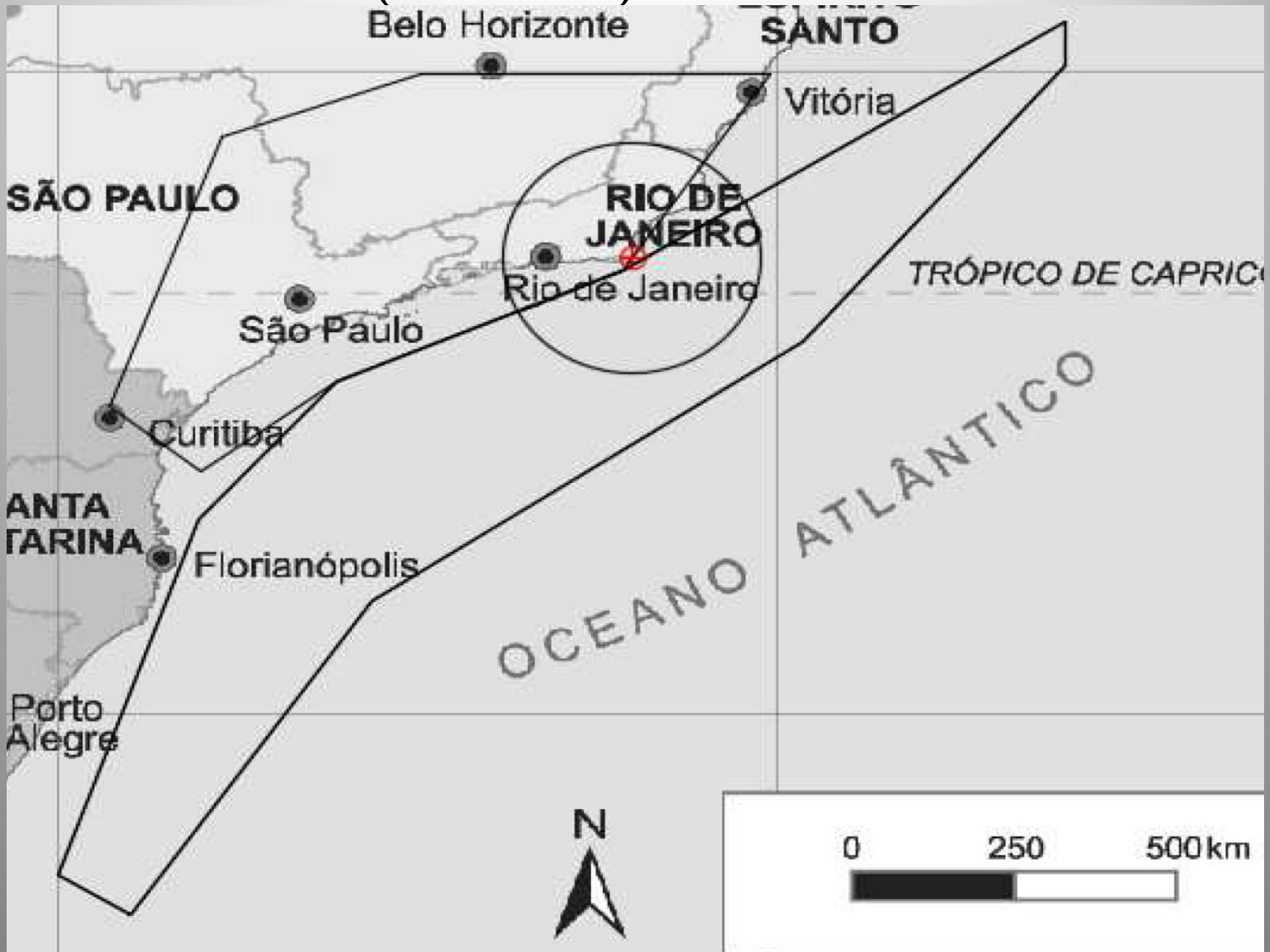


Offshore:

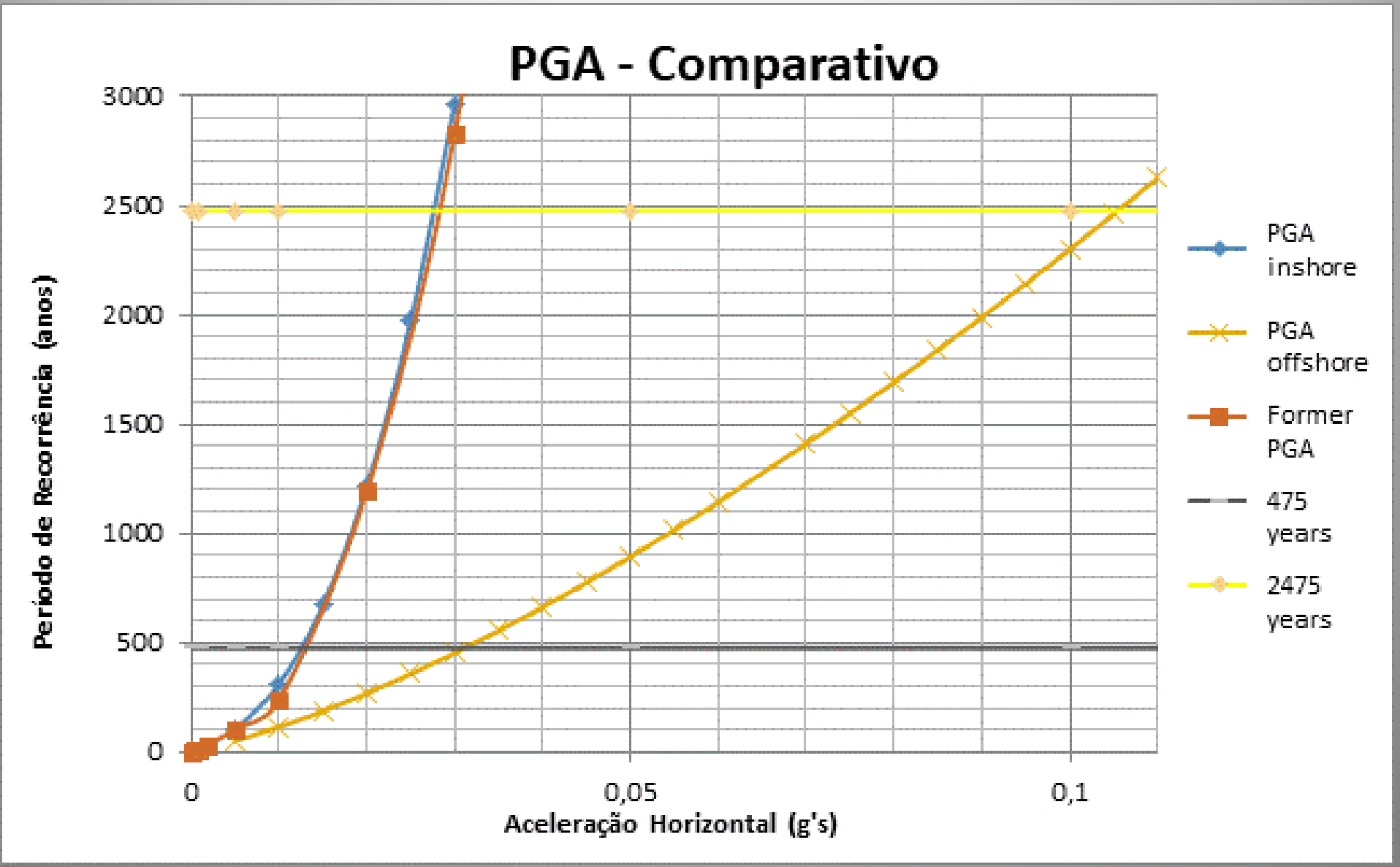
$$log_{10}(\sum N) = 2{,}4759 - 0{,}7629 \cdot M$$

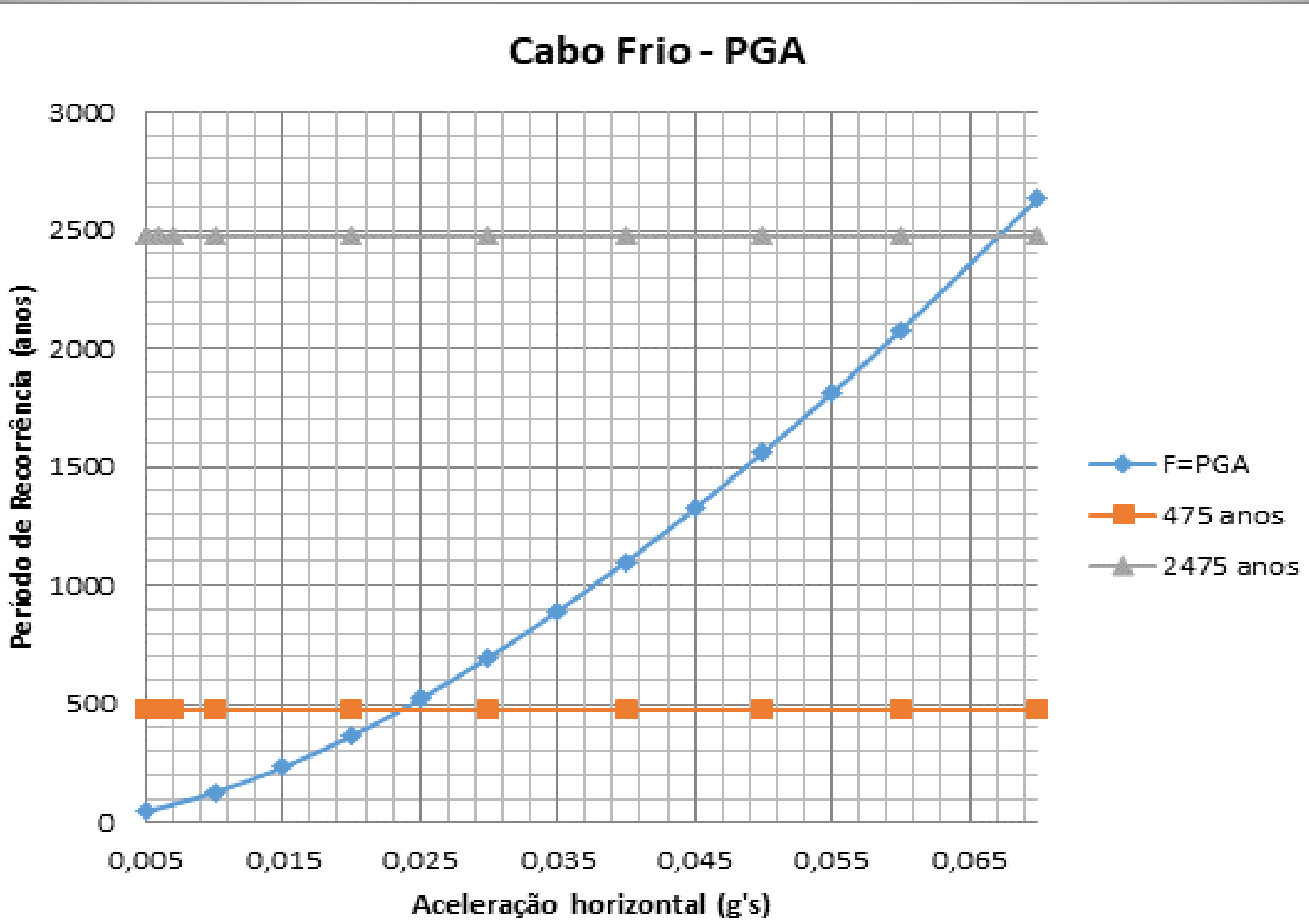


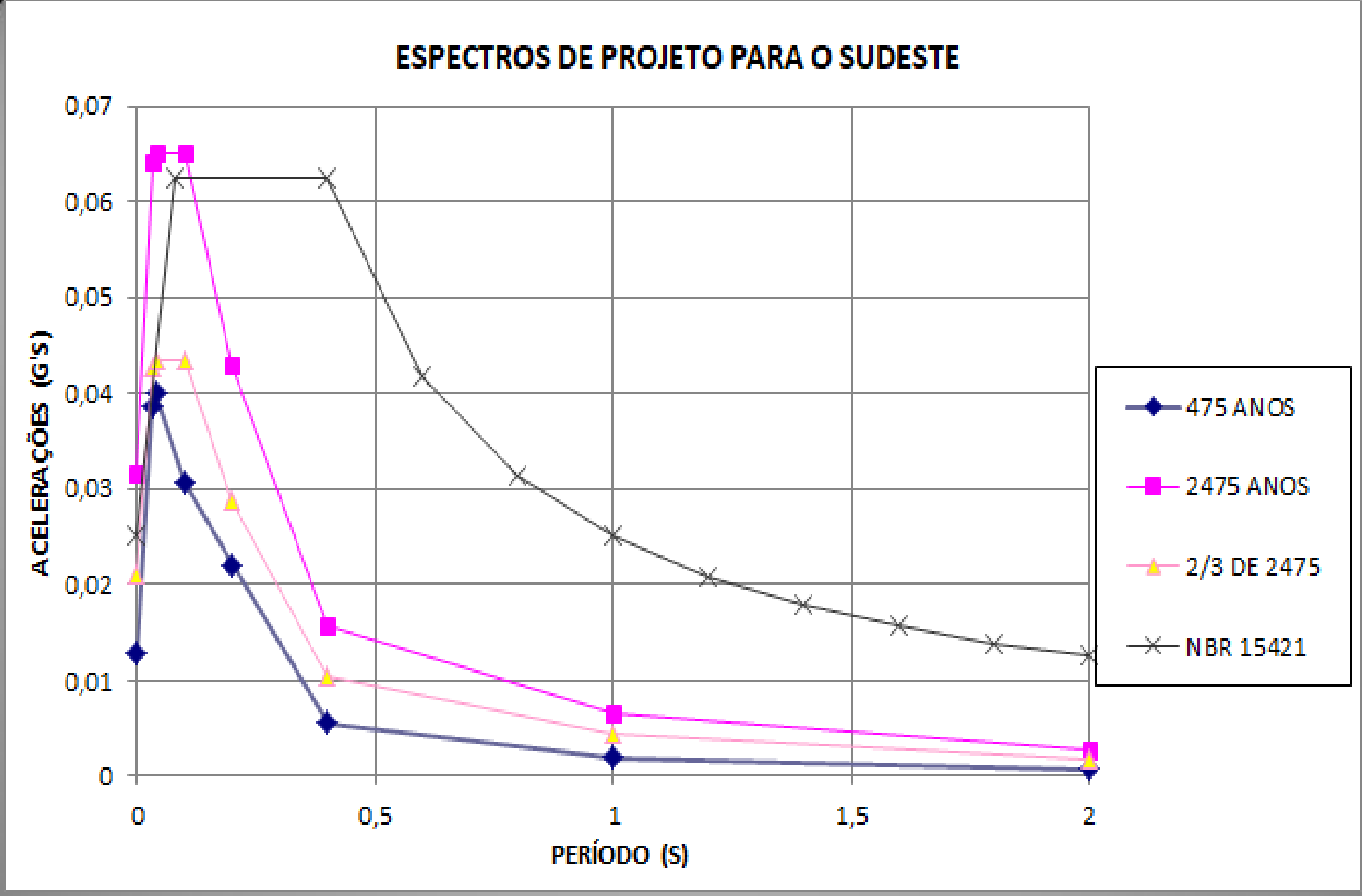
- Ponto analisado (Cabo Frio)



- **PGA – Comparação de resultados**




Cabo Frio - PGA
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Período de Recorrência (anos)
0,005
0,015
0,025
0,035
0,045
0,055
0,065
Aceleração horizontal (g's)
F=PGA
475 anos
2475 anos

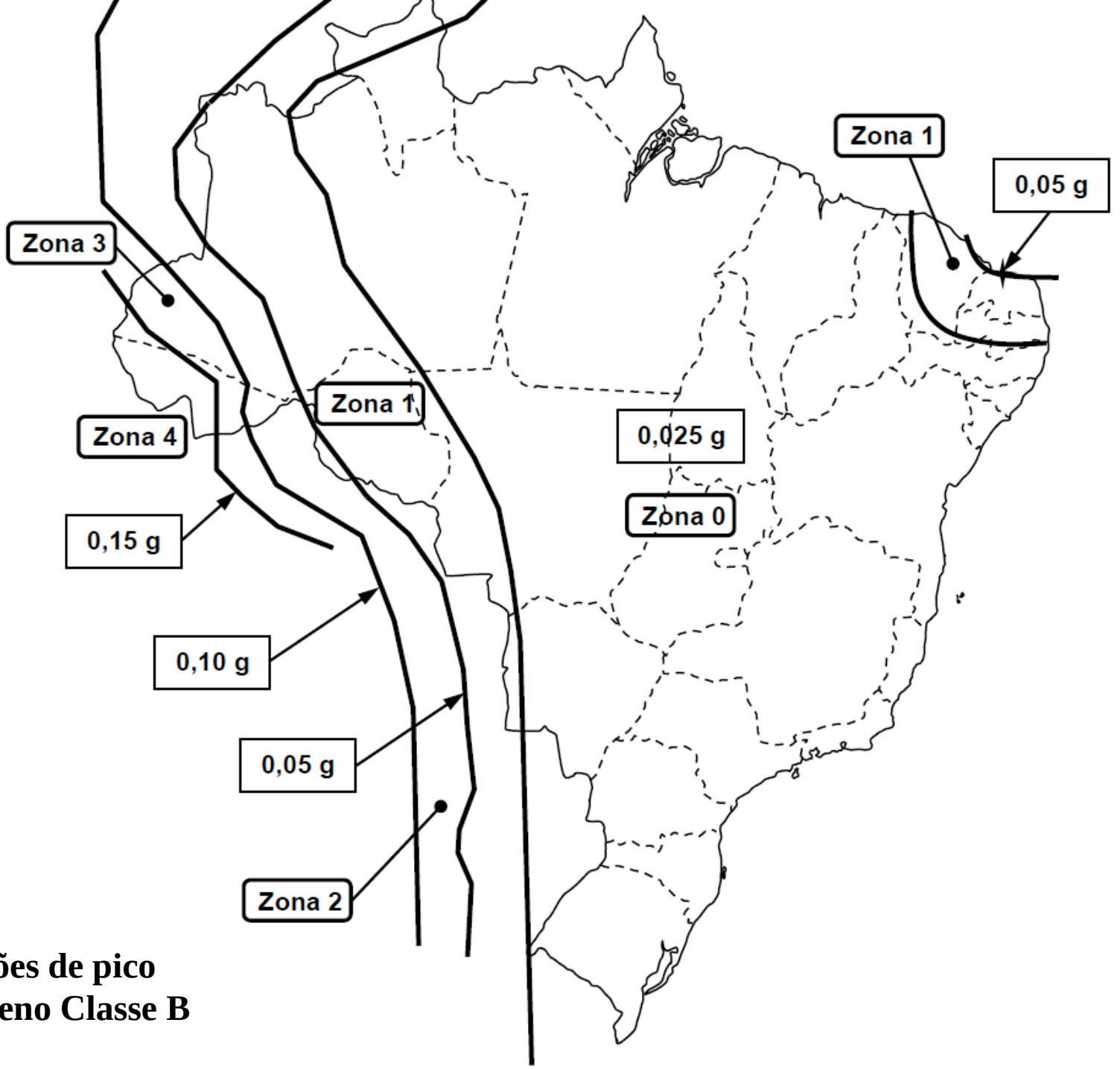

ESPECTROS DE PROJETO PARA O SUDESTE
ACELERAÇÕES (G'S)
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
0
0,5
1
1,5
2
PERÍODO (S)
475 ANOS
2475 ANOS
2/3 DE 2475
NBR 15421

Parte V- A Norma Brasileira de Sismos – ABNT NBR 15421:2006

- Considera-se como base normativa a NBR 8681 (Norma de Ações e Segurança nas Estruturas).
- Nos aspectos de resistência sísmica, foi tomada como base a Norma Americana ASCE/SEI 7-05.
- A combinação básica de cálculo é dada por:

$$E_d = 1{,}2E_g + 1{,}0E_q + 1{,}0E_{exc}$$

- E_d, E_g, E_q e E_{exc} são os valores de uma solicitação de cálculo e as respectivas parcelas das cargas permanente, acidental e sísmica nesta solicitação.
- São definidas cinco Zonas Sísmicas e três Categorias Sísmicas, relacionadas com as acelerações horizontais características a_g.



Acelerações de pico para terreno Classe B

CRITÉRIOS PARA A ANÁLISE SÍSMICA

•Para a Zona Sísmica 0, nenhuma verificação é exigida.

•Para a Zona Sísmica 1, pode ser feita uma verificação simplificada:

- São aplicadas a todos os pisos, nas duas direções horizontais, cargas horizontais iguais a 1% dos pesos permanentes.

•Para as estruturas de Categoria Sísmica B ou C (Zonas 2, 3 e 4), pode ser usado o método das forças horizontais equivalentes ou processo mais rigoroso (análise espectral ou análise por históricos de aceleração no tempo).

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

Zona sísmica	Categoria sísmica
Zonas 0 e 1	*A*
Zona 2	*B*
Zonas 3 e 4	*C*

MÉTODO DAS FORÇAS HORIZONTAIS EQUIVALENTES

- Força horizontal total na base da estrutura:

$$H = C_s \, W$$

W é o peso total permanente da estrutura.

- C_s é o menor entre os valores:

$$C_s = \frac{2{,}5 \cdot (a_{gs\,0} / g)}{(R / I)} \qquad C_s = \frac{(a_{gs\,1} / g)}{T\,(R / I)}$$

- a_{gs0} e a_{gs1} são as acelerações espectrais para 0,0s e 1,0s:

$$a_{gs0} = C_a \cdot a_g \text{ e } a_{gs1} = C_v \cdot a_g$$

- C_v e C_a dependem do subsolo local e de a_g.

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

Classes de terreno

Classe do terreno	Designação da Classe do terreno	Propriedades médias para os 30 m superiores do terreno	
		$\overline{v_s}$	$\overline{N}$
A	Rocha sã	$\overline{v_s} \geq 1500$ m/s	(não aplicável)
B	Rocha	1500 m/s $\geq \overline{v_s} \geq 760$ m/s	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	760 m/s $\geq \overline{v_s} \geq 370$ m/s	$\overline{N} \geq 50$
D	Solo rígido	370 m/s $\geq \overline{v_s} \geq 180$ m/s	$50 \geq \overline{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\overline{v_s} \leq 180$ m/s	$\overline{N} \leq 15$
	-	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. Turfa ou argilas muito orgânicas; 3. Argilas muito plásticas; 4. Estratos muito espessos (≥ 35 m) de argila mole ou média.	

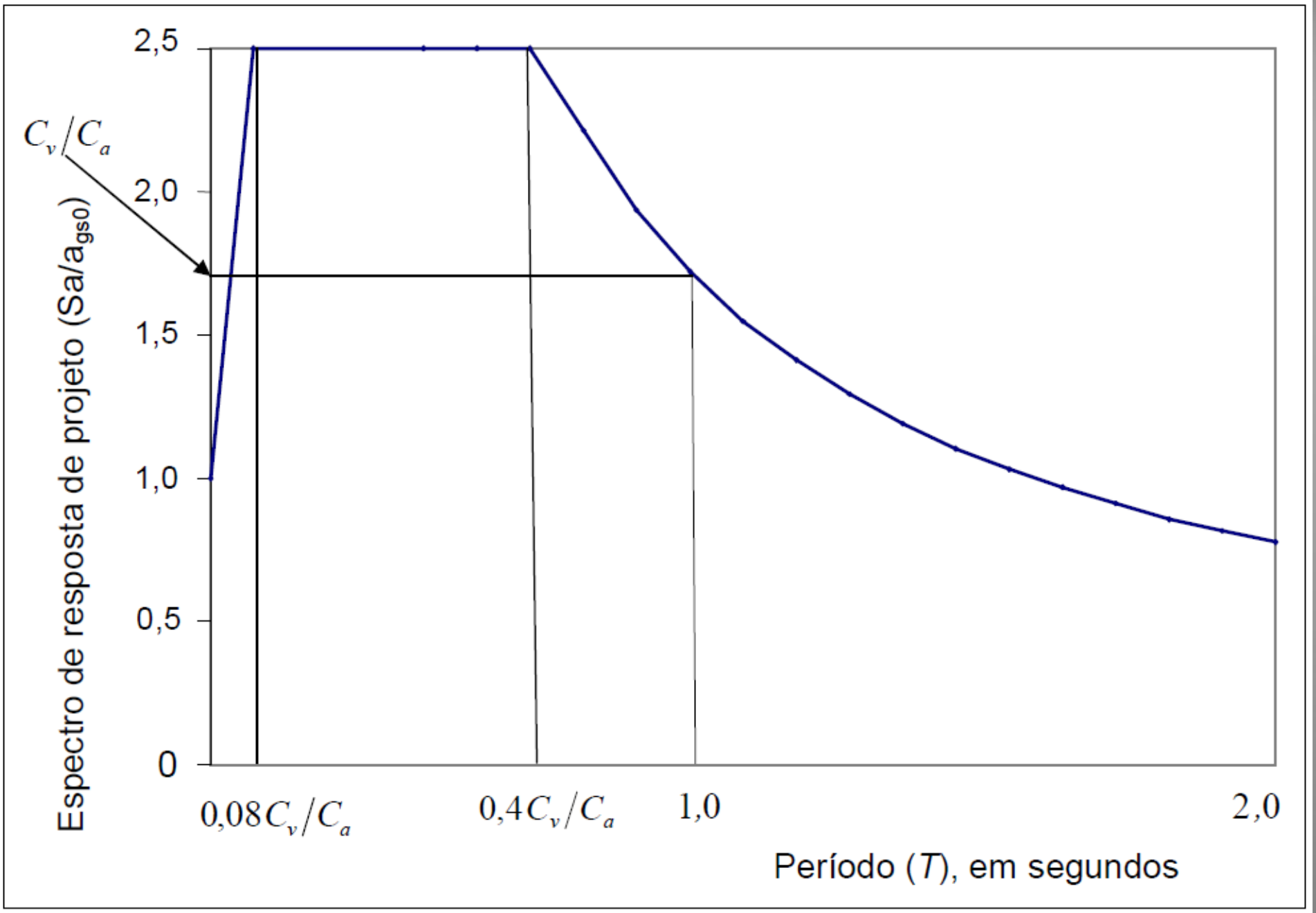
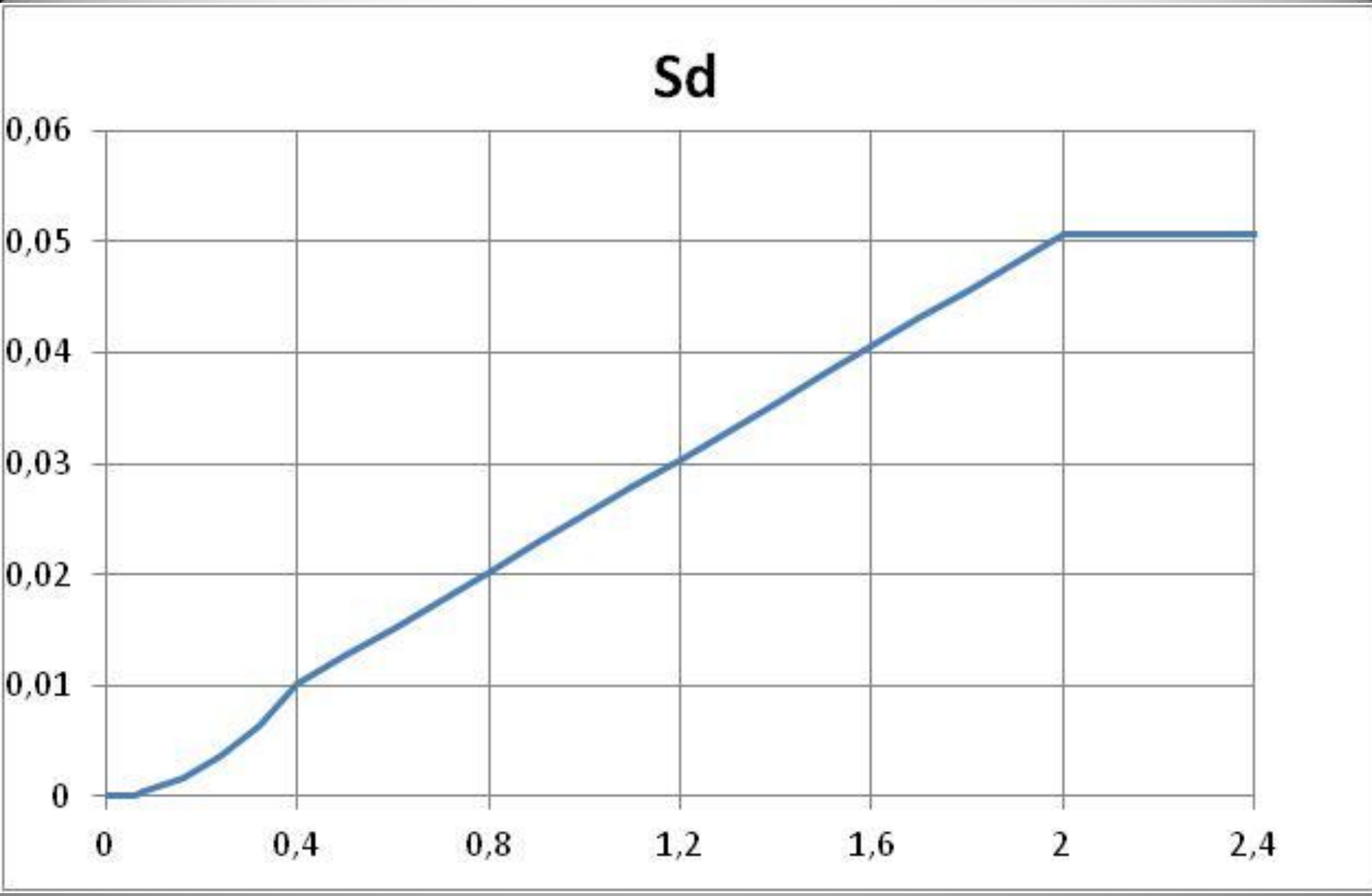


Figura 2 – Variação do espectro de resposta de projeto (S_a/ a_{gs0}) em função do período (T)


Sd
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2
2,4

•O período da estrutura (T) pode ser obtido como:

$$T_a = C_T \cdot h_n^{\,x}$$

(h_n - altura do edifício)

• C_T = 0,0466 e x = 0,9 (caso de forças resistidas por pórticos de concreto).

•I é o fator de importância de utilização; para edificações usuais, I = 1,0.

•R é o coeficiente de modificação de resposta (relativo à deformação inelástica). Para pórticos de concreto com detalhamento usual, R = 3.

- A força F_x aplicada a cada elevação é igual a:

$$F_x = C_{vx} \cdot H$$

com C_{vx} igual a:

$$C_{vx} = \frac{w_x \, h_x^k}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k}$$

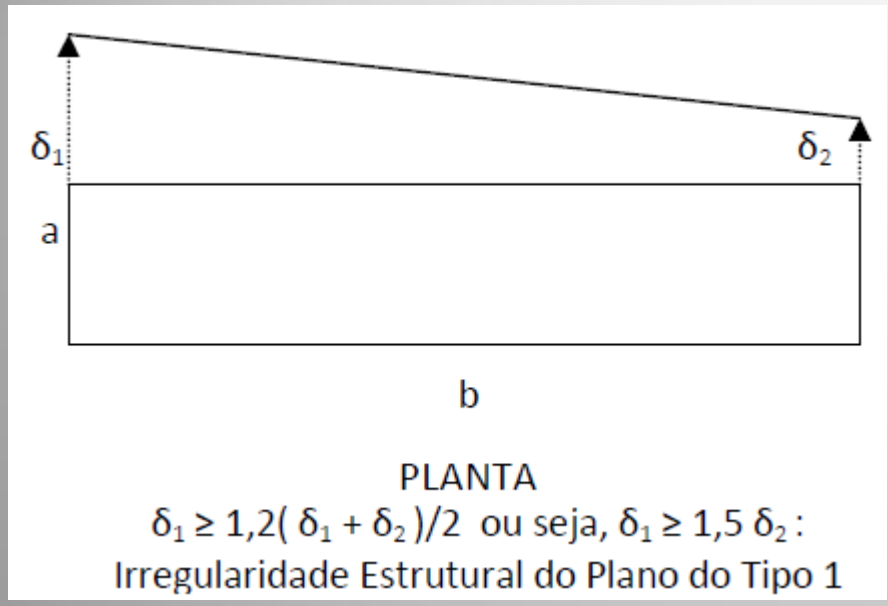
- w_i é o peso efetivo total relativo à elevação i
- h_i são as alturas entre a base e as elevações i ;

 - para períodos próprios inferiores a 0,5 s, $k = 1$;

 - para períodos entre 0,5 s e 2,5 s, $k = (T + 1{,}5)/2$;

 - para períodos próprios superiores a 2,5 s, $k = 2$.

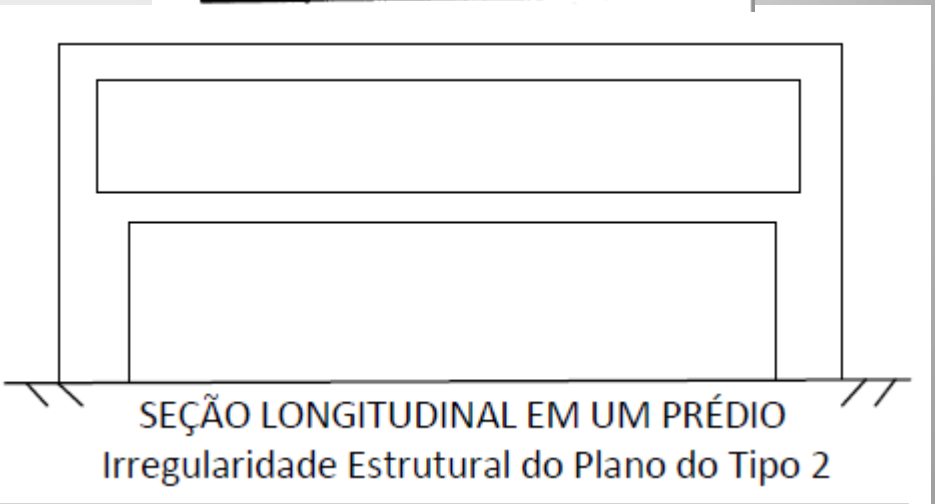
Irregularidades penalizadas pela Norma



PLANTA

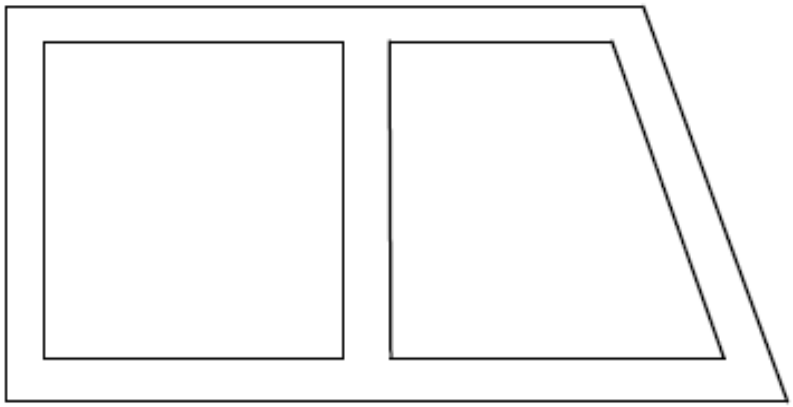
$\delta_1 \geq 1{,}2(\delta_1 + \delta_2)/2$ ou seja, $\delta_1 \geq 1{,}5\,\delta_2$:

Irregularidade Estrutural do Plano do Tipo 1



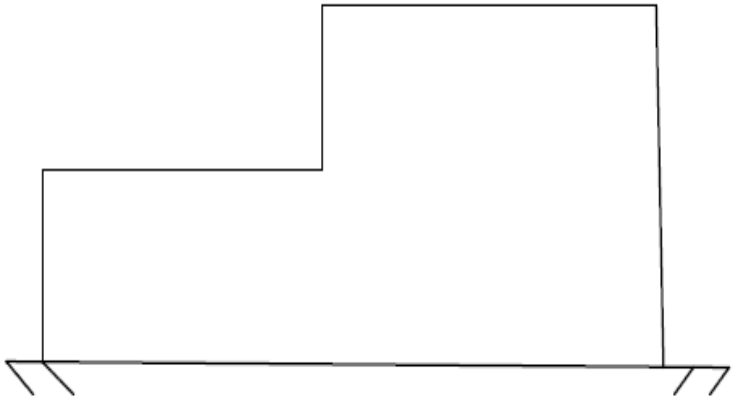
SEÇÃO LONGITUDINAL EM UM PRÉDIO

Irregularidade Estrutural do Plano do Tipo 2



PLANTA

Irregularidade Estrutural do Plano do Tipo 3



FACHADA

Irregularidade Estrutural na Vertical do Tipo 4

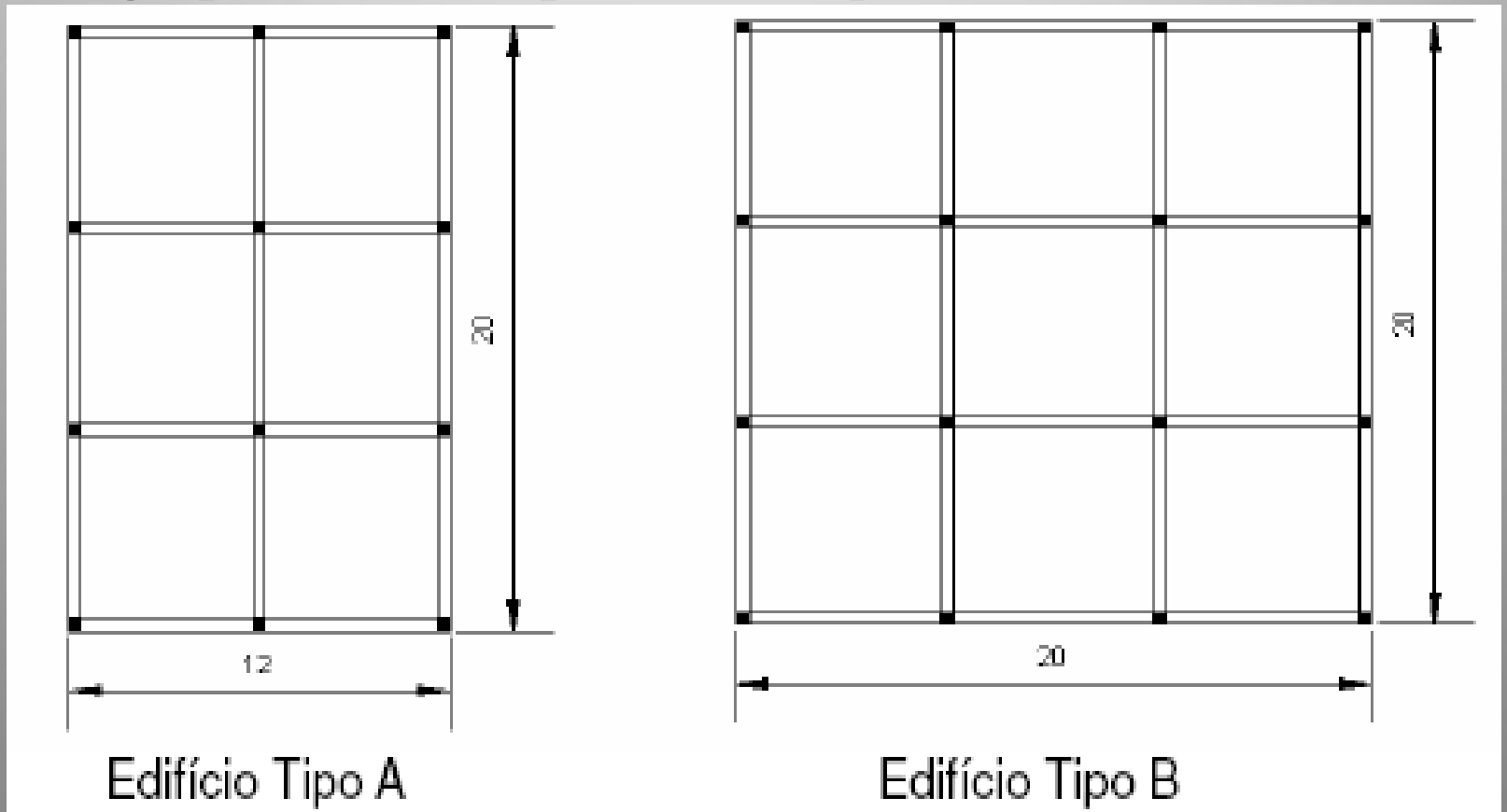
Estudo comparativo entre efeitos dos sismos e vento

- São comparados os efeitos dos sismos com os de vento em edifícios, no Brasil.
- As análises se desenvolvem para edifícios em várias cidades do Brasil, usando procedimentos automáticos do Sistema SALT – UFRJ.
- Uma comparação é feita, das forças globais decorrentes de sismo (forças elásticas) e vento, em prédios de 1 a 50 pavimentos, em três cidades no Brasil.

•São analisadas duas situações extremas (Edifícios Tipo A e B) para relações entre área exposta ao vento/ massa por andar:

•Edifício Tipo A (leve): Dimensões em planta: 12m x 20m; Carga permanente por metro quadrado: 8 kPa.

•Edifício Tipo B (pesado): Dimensões em planta: 20m x 20m; Carga permanente por metro quadrado: 12 kPa.



Edifício Tipo A

Edifício Tipo B

- As cargas de vento estão de acordo com a NBR-6123, com fatores S_1 e S_3 iguais a 1,00.

Cidade	Velocidade característica do vento (V_k) – m/s	Acelerações sísmicas características a_g (g's)
Rio Branco	30,0	0,10
Porto Velho	30,0	0,01
Corumbá	40,0	0,01

- Os resultados apresentados são forças horizontais e momentos totais nas bases dos prédios.
- Em Rio Branco (Zona Sísmica 3, Classes de Terreno A a E), as forças elásticas de sismo são claramente superiores às de vento.
- Em Porto Velho (situação similar à cidade de Fortaleza), em algumas situações, os efeitos do sismo podem suplantar os do vento.

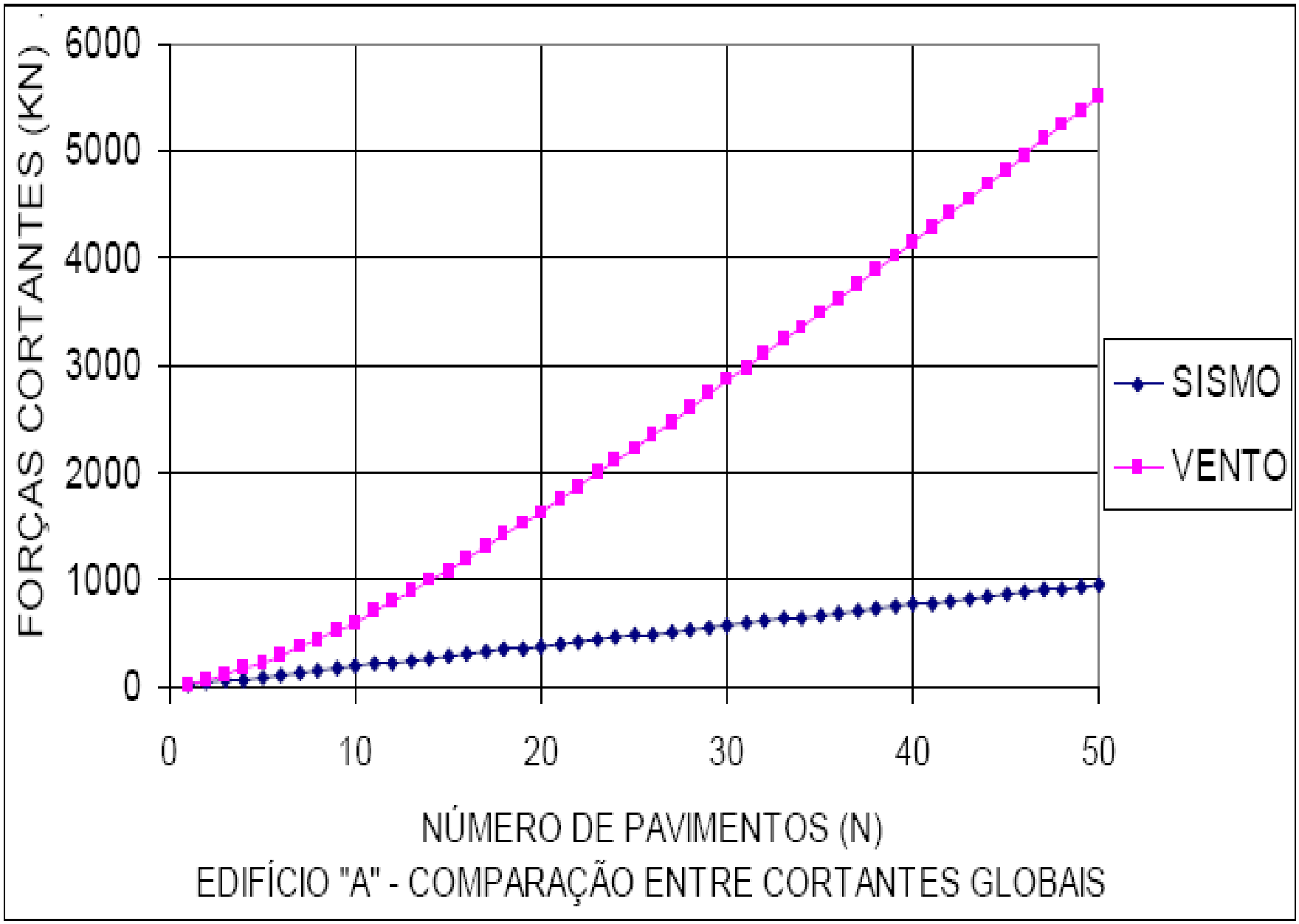


Figura 5 – Cidade de Corumbá – Edifício "A" - Comparação entre esforços cortantes globais

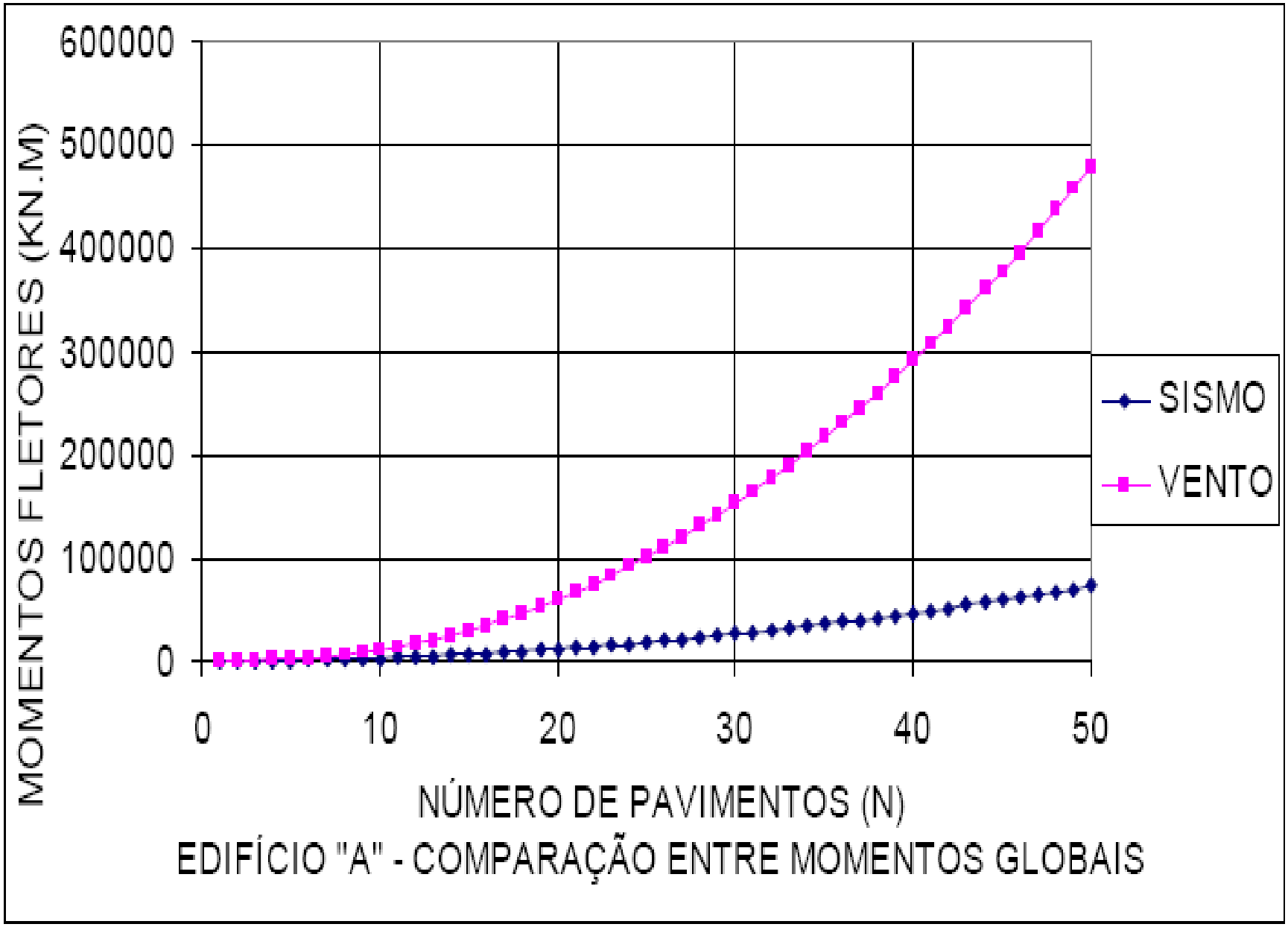


Figura 6 – Cidade de Corumbá – Edifício "A" - Comparação entre momentos fletores globais

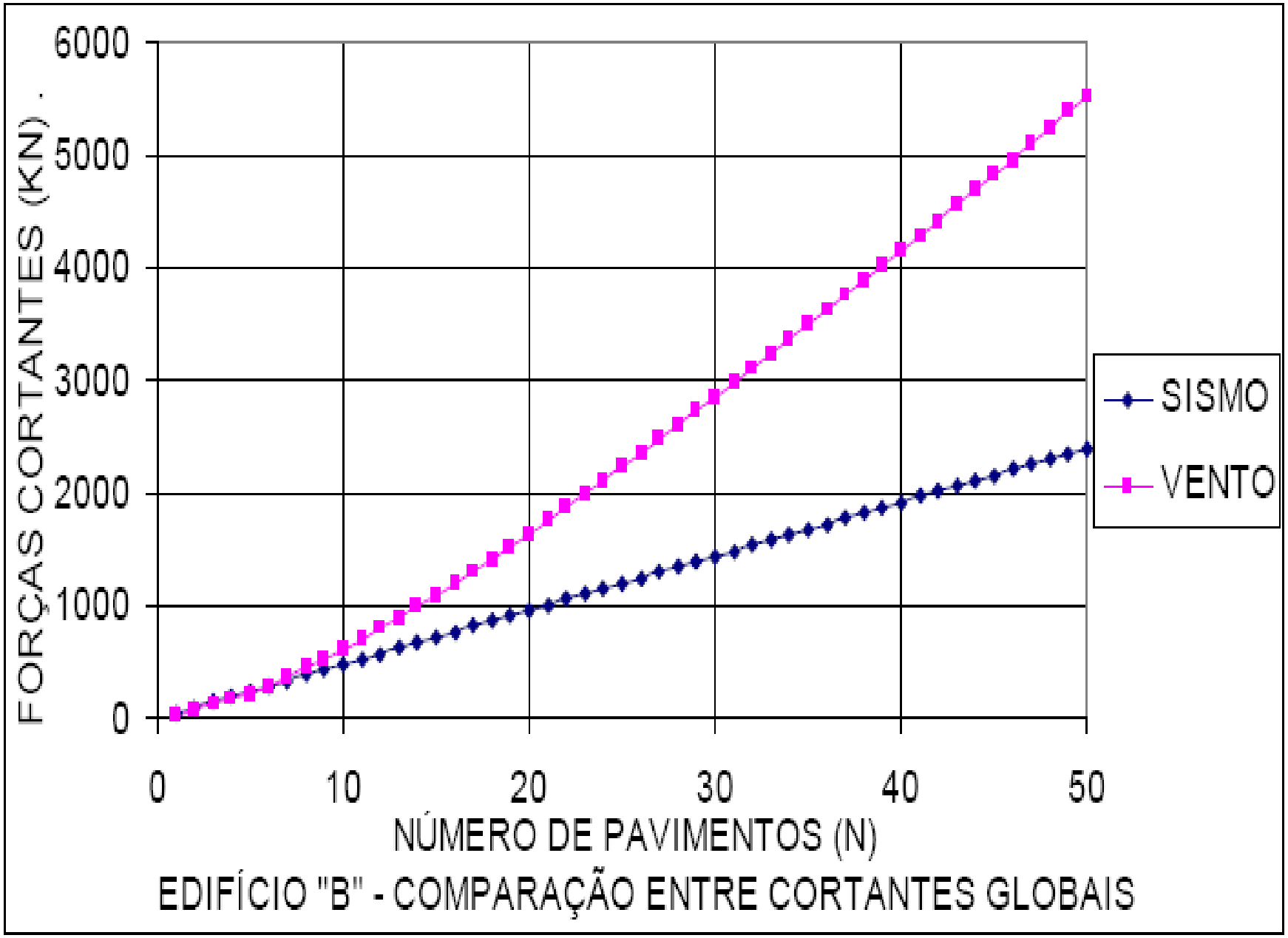


Figura 7 – Cidade de Corumbá – Edifício "B" - Comparação entre esforços cortantes globais

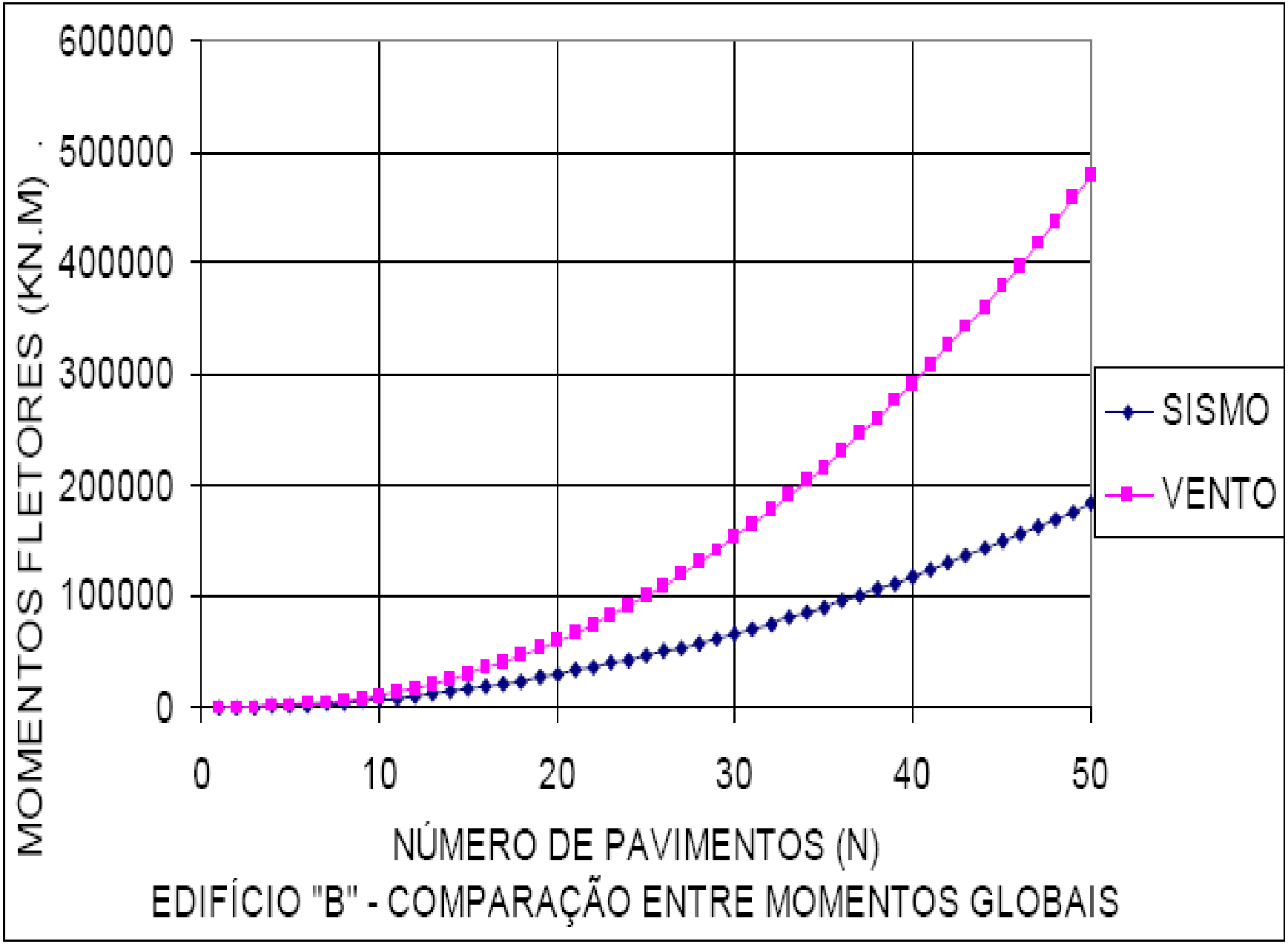


Figura 8 – Cidade de Corumbá – Edifício "B" - Comparação entre momentos fletores globais

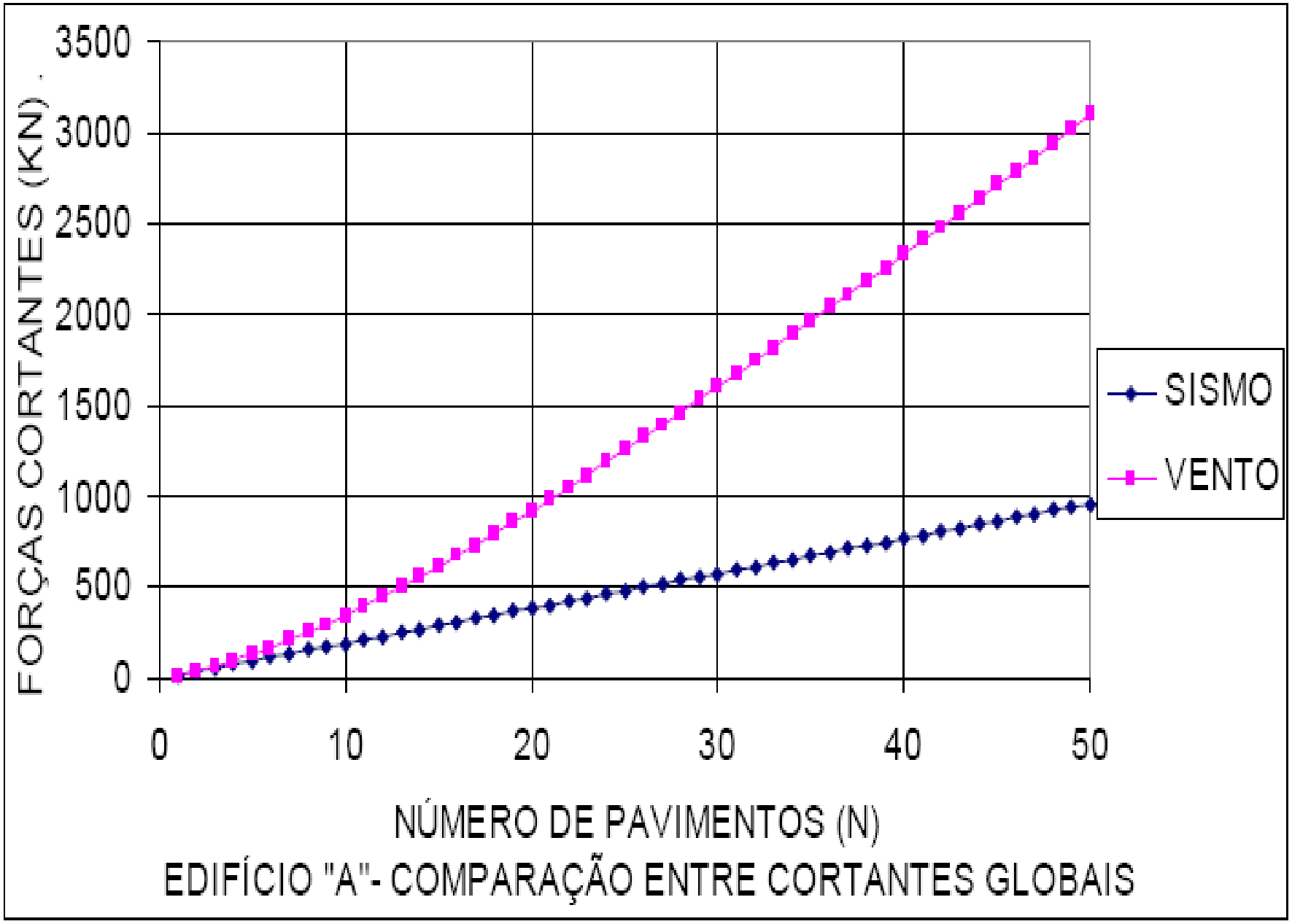


Figura 9 – Cidade de Porto Velho – Edifício "A" - Comparação entre esforços cortantes globais

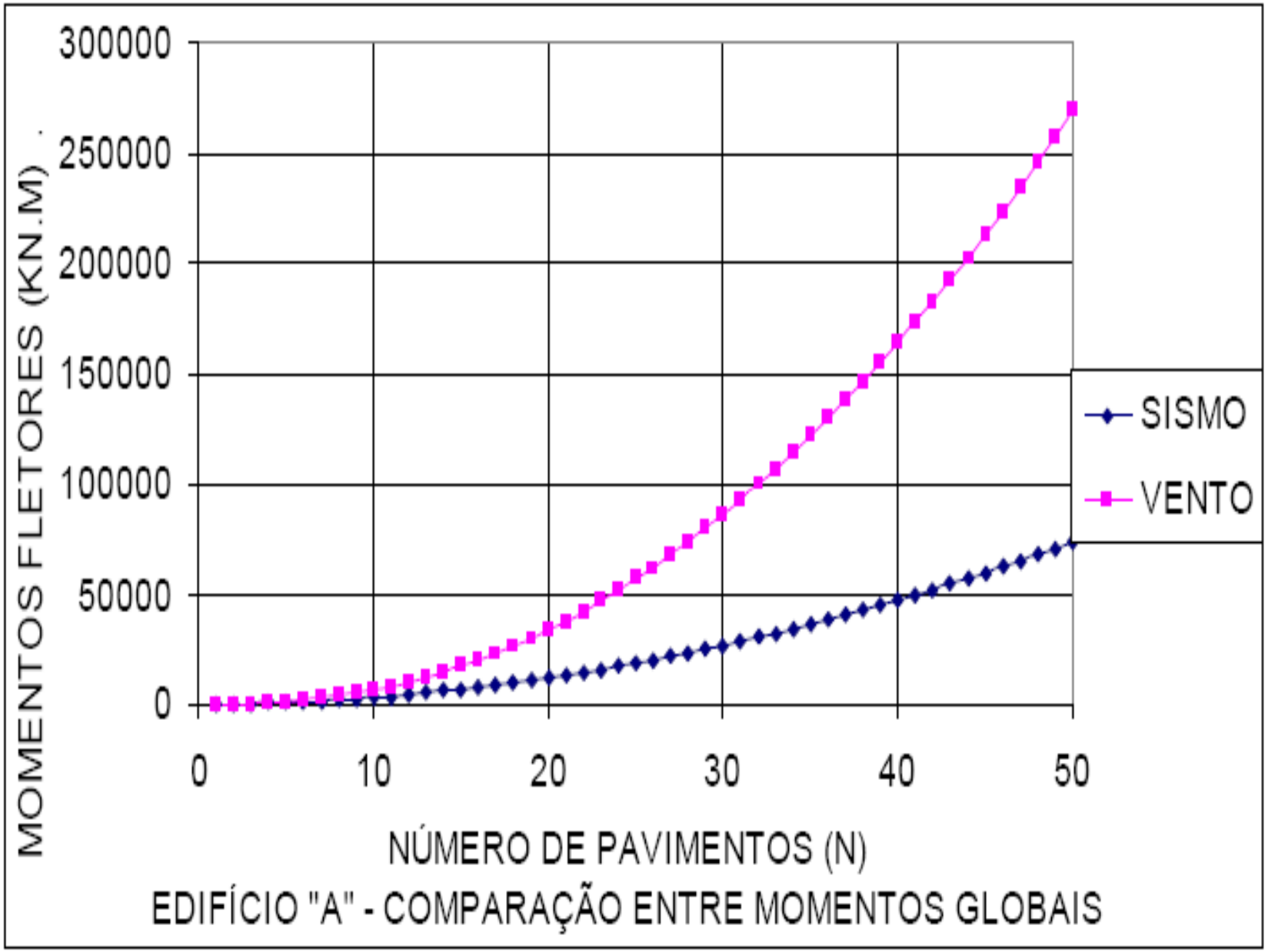


Figura 10 – Cidade de Porto Velho – Edifício "A" - Comparação entre momentos fletores globais

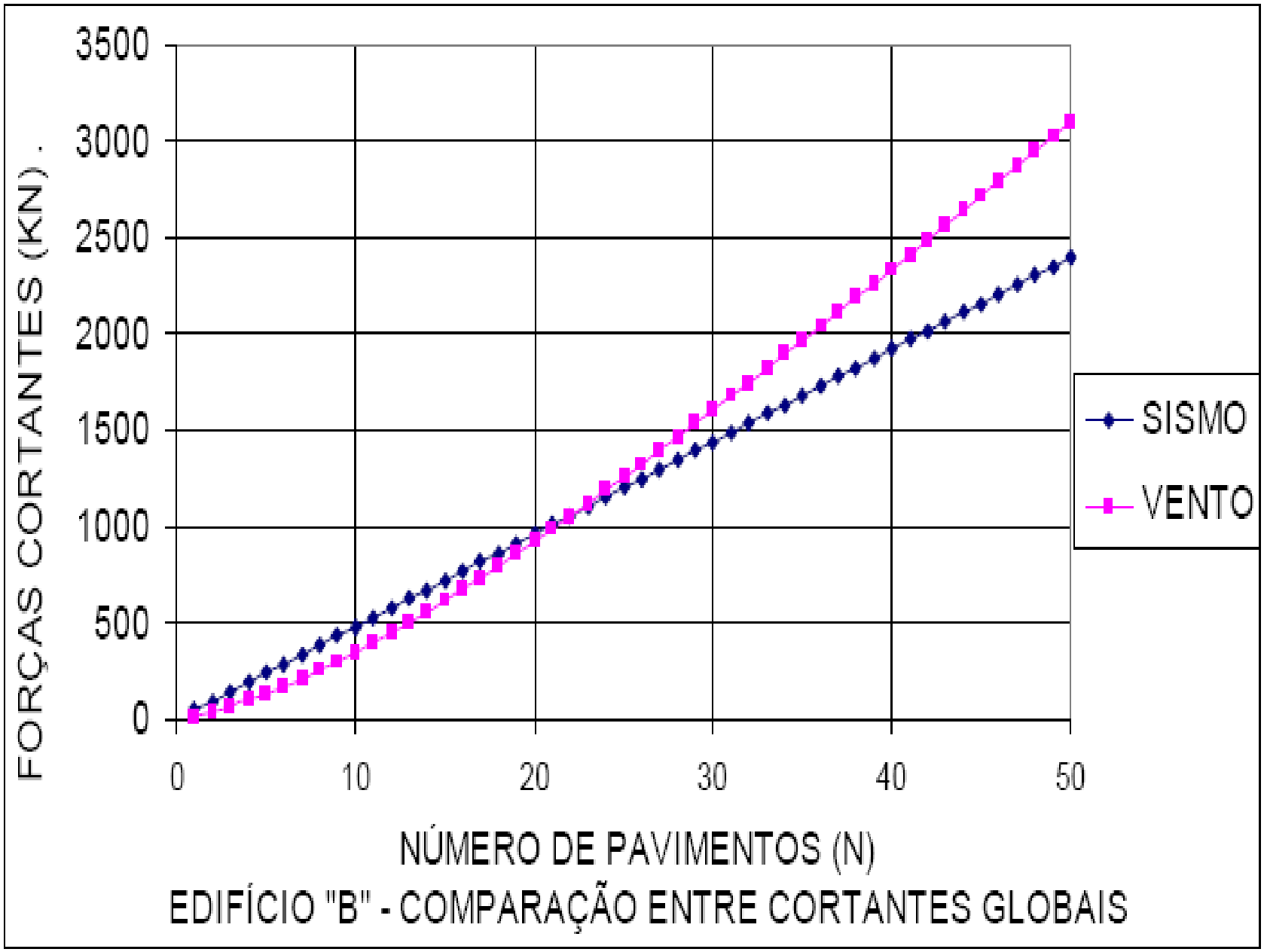


Figura 11 – Cidade de Porto Velho – Edifício "B" - Comparação entre esforços cortantes globais

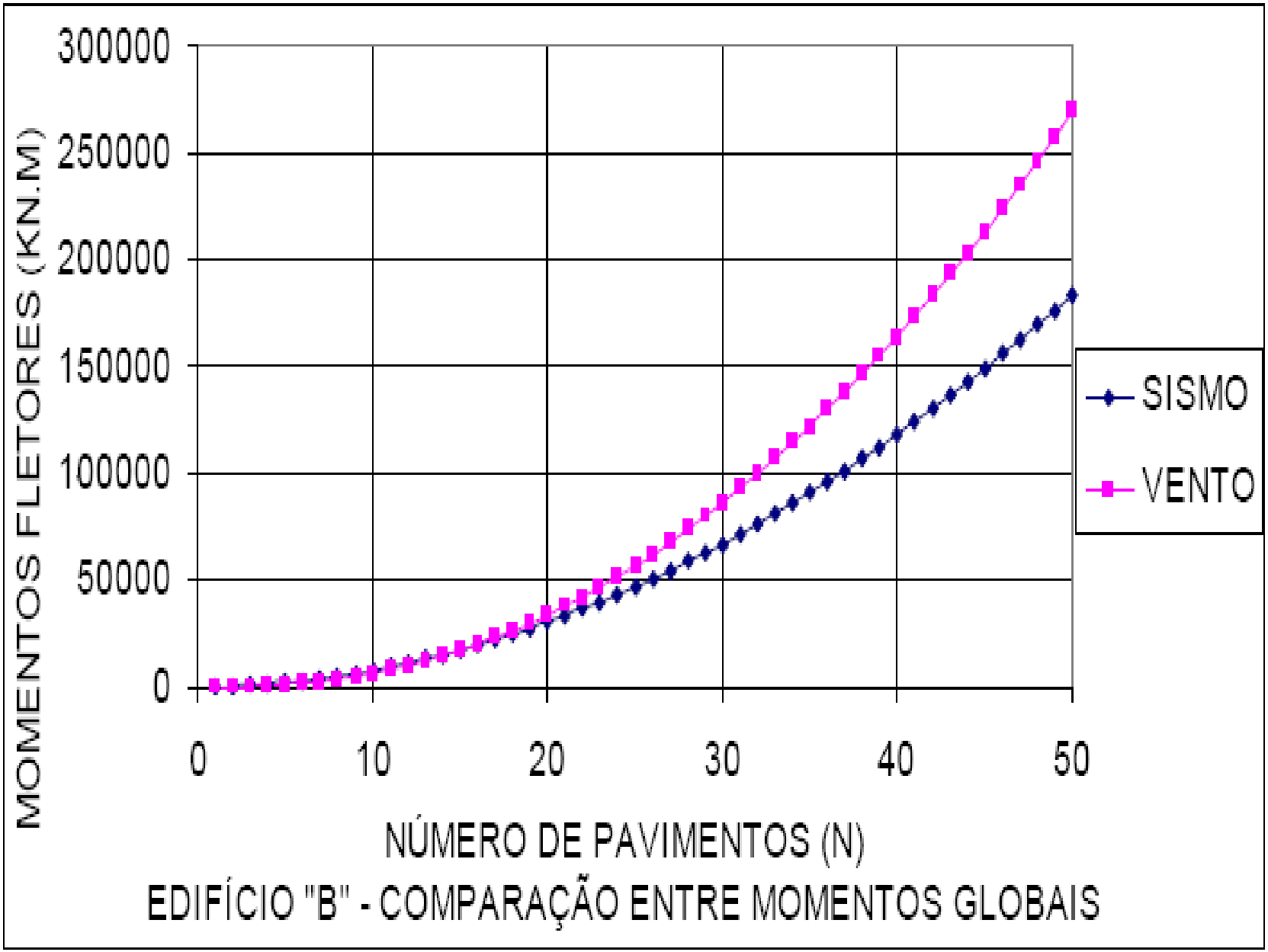


Figura 12 – Cidade de Porto Velho – Edifício "B" - Comparação entre momentos fletores globais

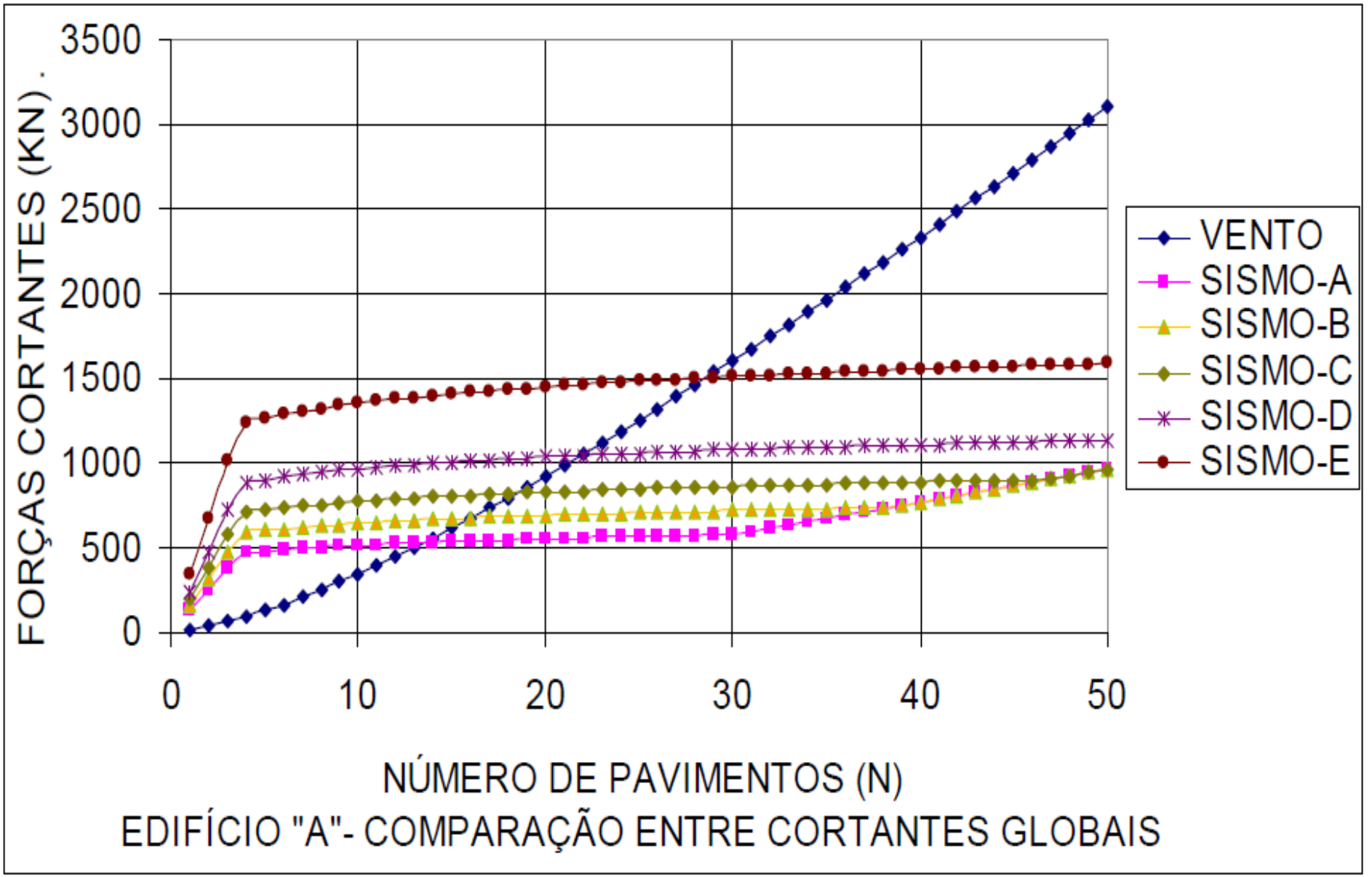


Figura 13 – Cidade de Rio Branco – Edifício “A” - Comparação entre esforços cortantes globais

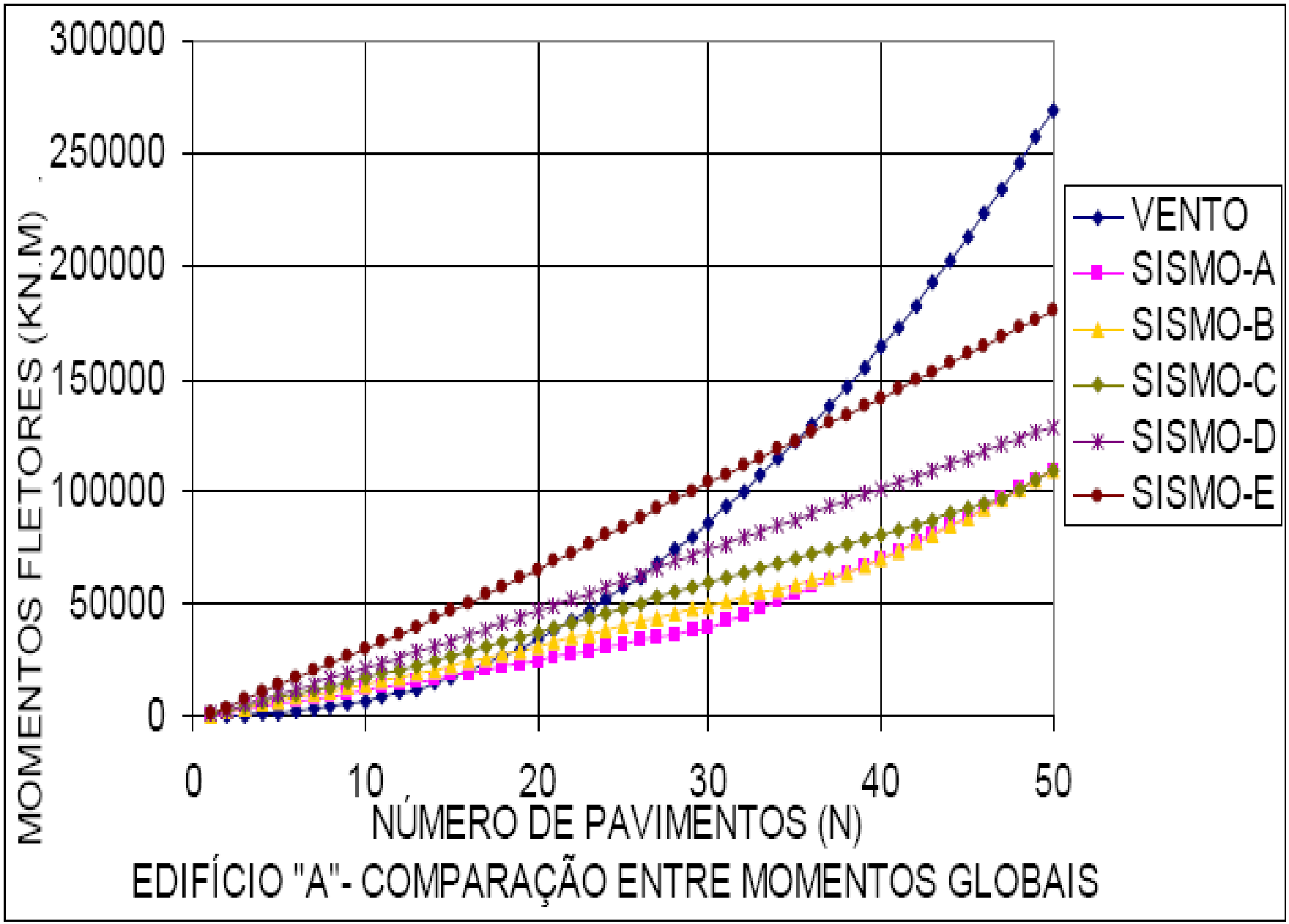


Figura 14 – Cidade de Rio Branco – Edifício "A" - Comparação entre momentos fletores globais

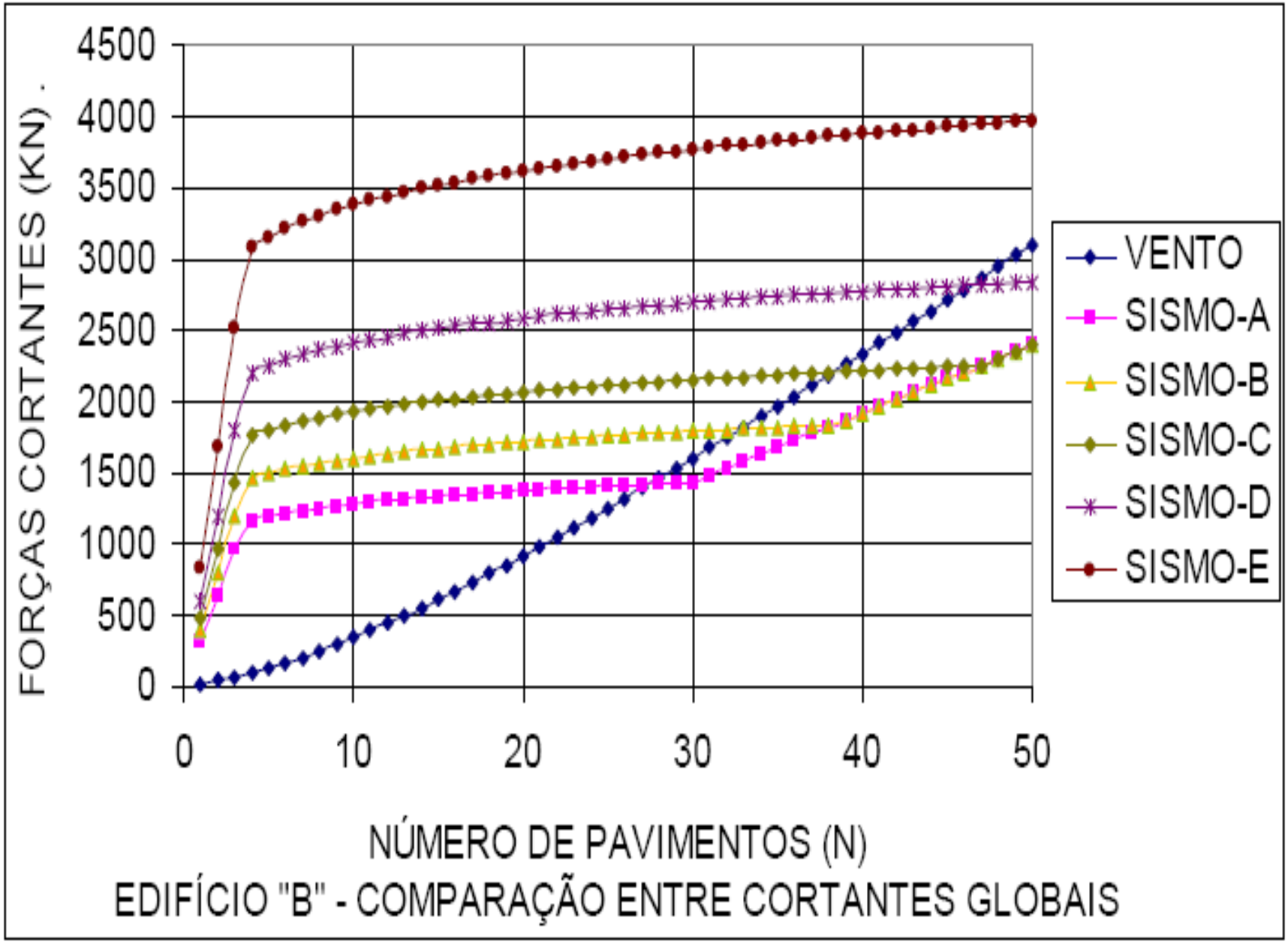


Figura 15 – Cidade de Rio Branco – Edifício "B" - Comparação entre esforços cortantes globais

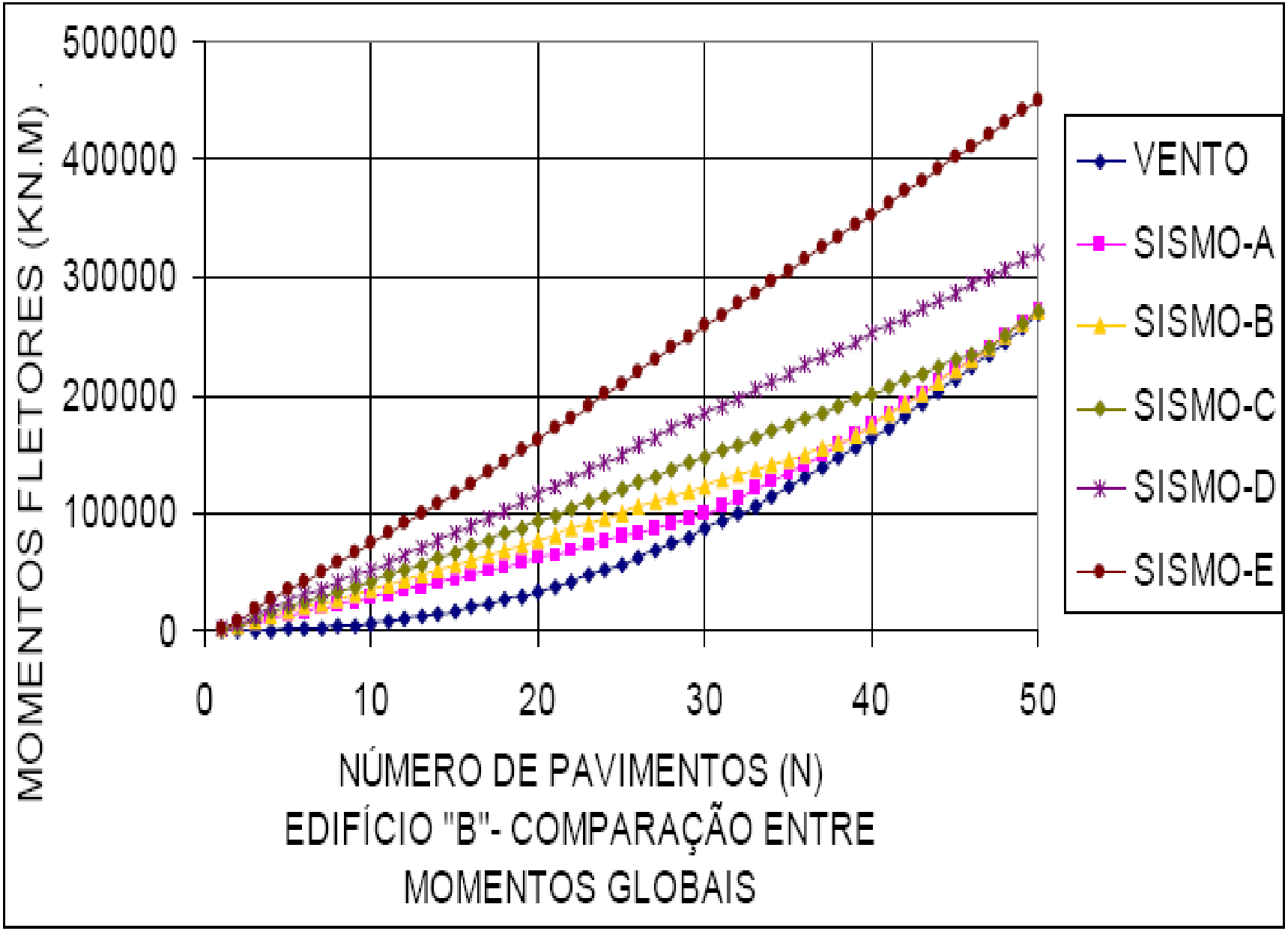


Figura 16 – Cidade de Rio Branco – Edifício "B" - Comparação entre momentos fletores globais