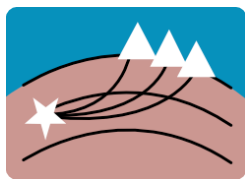


Tremores de terra ocorridos em Mariana/Bento Rodrigues, MG, no dia 05/11/2015



Centro de Sismologia da USP 06-Novembro-2015, 19hs

1. Registros sismológicos dos eventos de 05/11/2015

Seis pequenos tremores de terra, próximos à Mineração Samarco, na área de Catas Altas e Bento Rodrigues, MG, ocorreram na tarde de 05/11 e foram registrados por algumas estações da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) localizadas entre 150 e 400 km dos epicentros. A Tabela 1 indica as horas de ocorrência, coordenadas e magnitudes. É importante frisar que, devido à grande distância das estações, a precisão da localização epicentral é da ordem de 10 km, no melhor caso. O evento 4, o maior dos seis, teve registros um pouco mais claros e o epicentro deve ter um erro da ordem de 5 a 10 km. Infelizmente, a RSBR não tem estações suficientes para uma localização mais precisa dos epicentros.

Tabela 1. Tremores registrados pela Rede Sismográfica Brasileira na região da Mineração Samarco, em Mariana, MG. As profundidades dos eventos foram fixadas em 0 km pois não há resolução para determinação precisa. Hora Local (de verão) = Hora UT - 2 hs.

Evento	Hora Local	Coordenadas		Incerteza no epicentro (km)	Magnitude m_R
		Latit. (°)	Long. (°)		
1	13:01:50	-20.0	-43.3	20	2.3
2	13:06:07	-20.2	-43.6	20	2.5
3	14:12:15	-20.08	-43.50	20	2.4
4	14:13:51	-20.20	-43.48	10	2.6
5	15:56:42	-20.2?	-43.5?	-	2.0?
6	15:59:28	-20.00	-43.60	20	2.2

Os dois tremores das 14hs foram sentidos por diversas pessoas na região da Mineração em locais a poucos km do epicentro 5, segundo comunicação da Samarco no dia 05/11. Tremores com magnitudes menores que 3 geralmente não são sentidos pela população a mais de 20 km. Tremores de magnitude ~2.5 normalmente são sentidos no máximo até ~10 km. As informações de que os tremores foram sentidos apenas na área da Mineração é compatível com a baixa magnitude.

A estação mais próxima (BSCB) em Bom Sucesso, a 150 km de distância, mostra que as ondas P (longitudinais) e S (transversais) têm a mesma forma e chegam no mesmo tempo relativo (i.e., a diferença entre as chegadas das ondas P e S é a mesma com uma margem de erro de menos de 0.1s, como se vê nas Figuras 1 a 3. Isso significa que os tremores da Tabela 1 tiveram praticamente o mesmo epicentro. As diferenças entre as localizações da Tabela 1 se devem a incertezas nas marcações das ondas P e S.

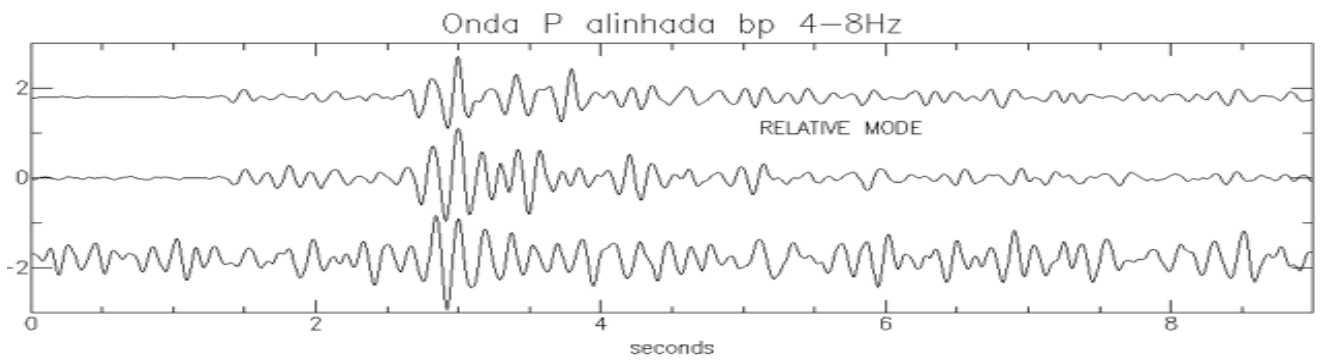


Fig. 1. Ondas P dos eventos 3, 4 e 6, registradas na estação BSCB (amplitudes normalizadas). A chegada da primeira onda P é no tempo 1.3s (Pg), a onda no tempo ~2.5s provavelmente é a onda PmP (reflexão da base da crosta). Os três traços foram alinhados pelo maior pico da onda PmP.

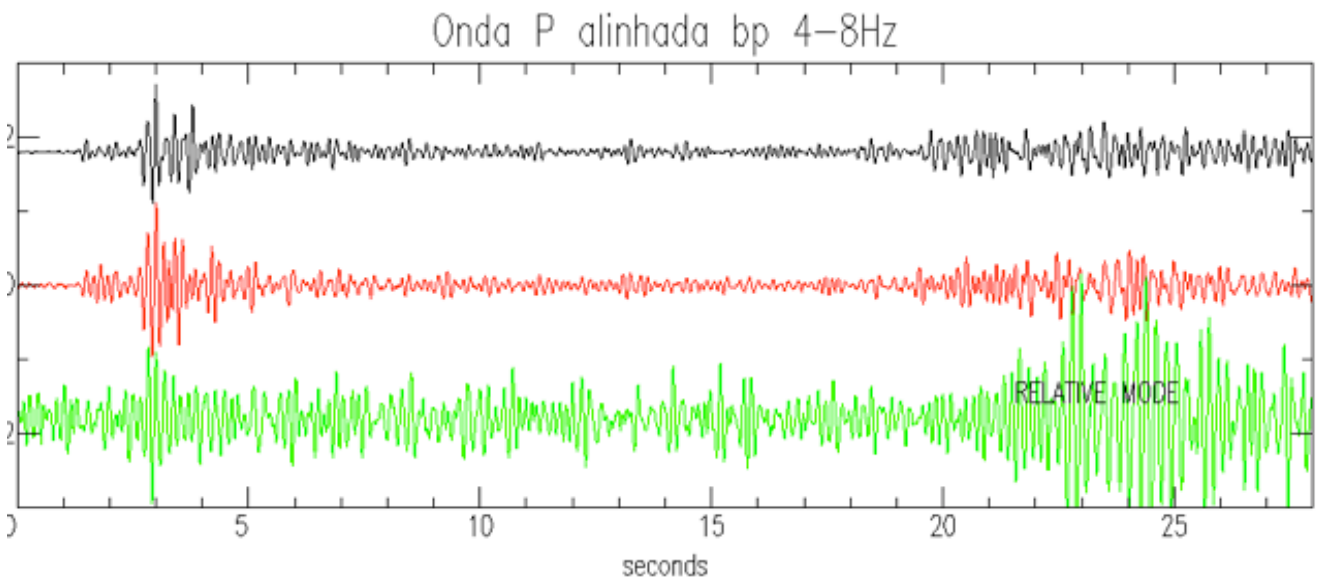


Fig. 2. Ondas P e S, alinhadas pela onda PmP, na mesma estação BSCB. Eventos 3 (preto) ao alto, 4 (vermelho) no centro, e 6 (verde) em baixo.

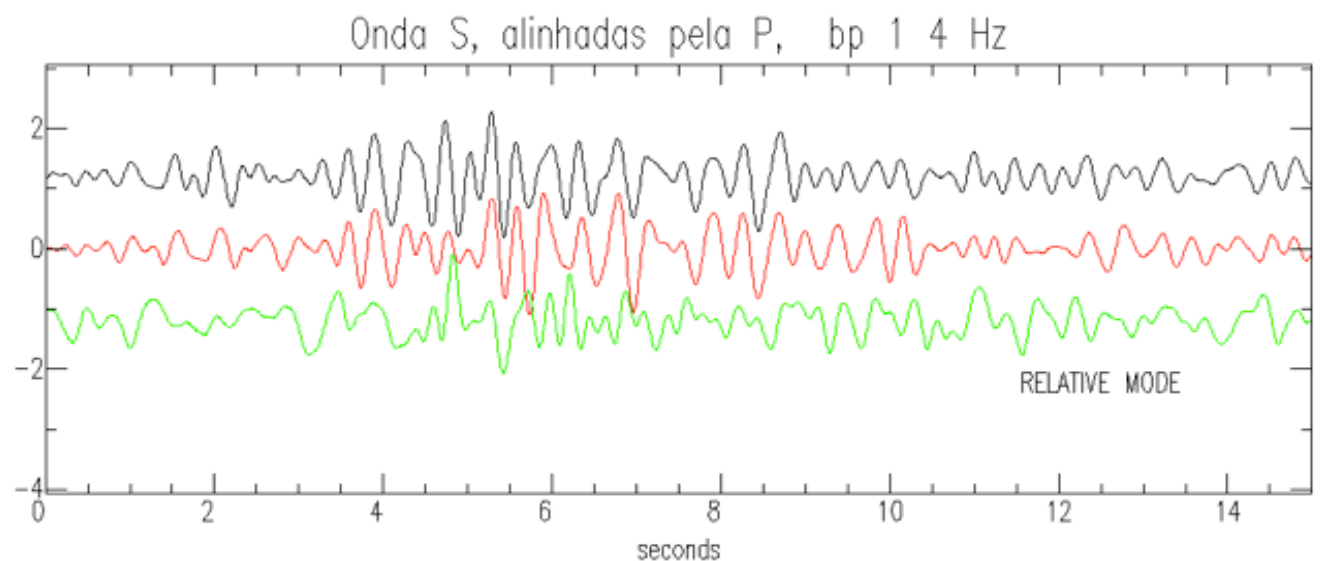


Fig. 3. Ondas S em BSCB, filtradas entre 1 e 4 Hz. Os traços estão alinhados pelo maior pico da onda PmP (fora do gráfico). Apesar do alto ruído do evento 6 (de magnitude 2.2), nota-se que as ondas se correlacionam razoavelmente bem com os dois eventos maiores, o que mostra que o epicentro dos três tremores é praticamente o mesmo.

As Figuras 4 e 5 mostram a localização do epicentro do sismo maior das 14:13:51 (H.Local) e as cidades próximas.



Fig. 4. Epicentro (botão amarelo) do sismo das 14:13:51 (H.Local), ~20 km a norte de Mariana.



Fig. 5. Epicentro do sismo principal, às 14:13:51 (H.Local), na área da Mineração Samarco. O epicentro está a 3 km da barragem do Fundão que se rompeu. A margem de erro na localização epicentral é de ~10km.

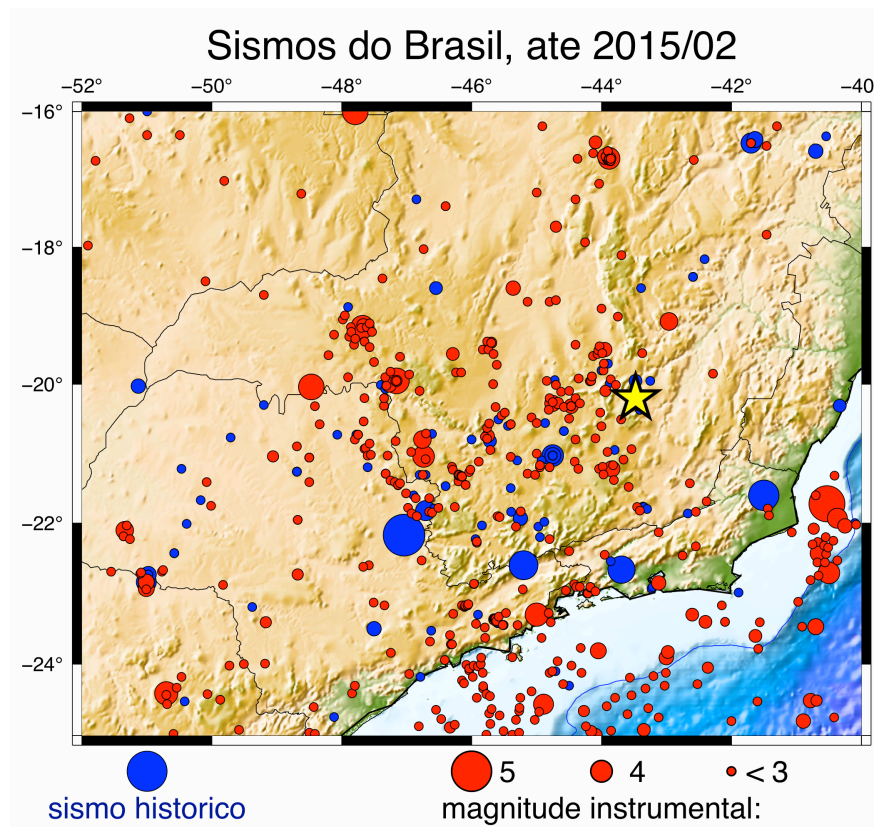


Fig. 6. Epicentros do catálogo de sismos do Brasil: círculos vermelhos são eventos determinados por estações sismográficas, azuis eventos históricos. A estrela amarela é o local da Mineração Samarco.

2. Sismicidade histórica regional

Pequenos tremores de terra não são incomuns no Brasil e mesmo em Minas Gerais. Tremores de magnitude ~ 2.5 ocorrem praticamente todos os dias no Brasil, mas quase sempre passam despercebidos por ocorrerem longe de cidades, ou longe de estações sismográficas da RSBR.

A região leste de Minas Gerais tem histórico de sismos (ver Fig. 6), e é uma das “zonas sísmicas” usadas na preparação do Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil. O maior tremor nesta parte de Minas Gerais, que se tem registro até hoje, não ultrapassou magnitude 4 na escala Richter. O mapa da Fig. 6 mostra os epicentros do catálogo de sismos do Brasil e a localização do epicentro principal na área da Mineração Samarco.

Pode-se concluir, portanto, que pequenos tremores de terra nessa parte de Minas Gerais são relativamente comuns e não se trata de um fenômeno anormal. As causas dos tremores de terra no Brasil (assim como em qualquer região no interior de uma placa tectônica) se devem à combinação de tensões geológicas devidas à movimentação da placa Sul-Americana junto com tensões de origem local (e.g., Assumpção et al., 2014; Agurto-Detzel et al., 2015).

3. Rompimento da barragem

O horário exato do rompimento da barragem ainda não é bem conhecido. Segundo a Folha de São Paulo on-line, de 05/11/2015, o acidente ocorreu entre as 15h30 e as 16h (<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/11/1702717-barragem-de-mineradora-se-rompe-no-interior-de-minas-gerais.shtml>). Outras notícias dizem por volta das 16:20. Desta

maneira, os dois primeiros tremores perto das 13hs (magnitudes 2,3 e 2,5) ocorreram entre 2,5 e 3 horas antes do rompimento. Mais dois sismos fortes ocorreram perto das 14hs, 1,5 a 2 horas antes do acidente. Os outros dois tremores mais fracos (magnitudes 2,0 e 2,2, das 15:56 e 15:59) podem ter ocorrido bem próximos ao rompimento.

Normalmente tremores de magnitude 3 ou menores não causam danos diretamente em estruturas e construções e são sentidos apenas levemente. Há exceções nos casos em que o hipocentro seja bem raso e bem próximo à instalações, como os tremores induzidos em Bebedouro, SP, em 2005. Naquele caso, tremores de magnitude ~ 3.0 chegaram a provocar intensidades VI a VII na escala Mercalli Modificada (trincas em paredes de casas de boa qualidade na área epicentral), como reportado por Assumpção et al.(2010), por ocorrerem a profundidades de poucas centenas de metros.

Estudos de intensidade das vibrações do terreno para sismos pequenos e rasos (Douglas et al., 2013) indicam que magnitudes $M_w=2,5$ costumam provocar acelerações de pico da ordem de 0.04 m/s^2 ($0.4\% \text{ g}$), a distâncias de até 5 km. Valores de acelerações do terreno têm grande variabilidade (duas a três ordens de magnitude), como se vê pela dispersão dos dados observados na Fig. 7. Embora pouco prováveis, magnitudes $M=2.5$, a distâncias curtas, pode provocar acelerações do terreno de até $0,5 \text{ m/s}^2$ ($5\% \text{ de g}$), correspondentes a intensidades VI na escala Mercalli Modificada (efeito característico de pequenas trincas em paredes de casas normais, e queda de reboco). A relação entre intensidades na escala Mercalli e acelerações de pico (PGA) é altamente incerta. Mesmo assim, os dados de Douglas et al.(2013) mostrados na Fig. 7 indicam que, embora pouco provável, é possível que sismos de magnitude 2.5 possam provocar acelerações fortes a distâncias hipocentrais pequenas.

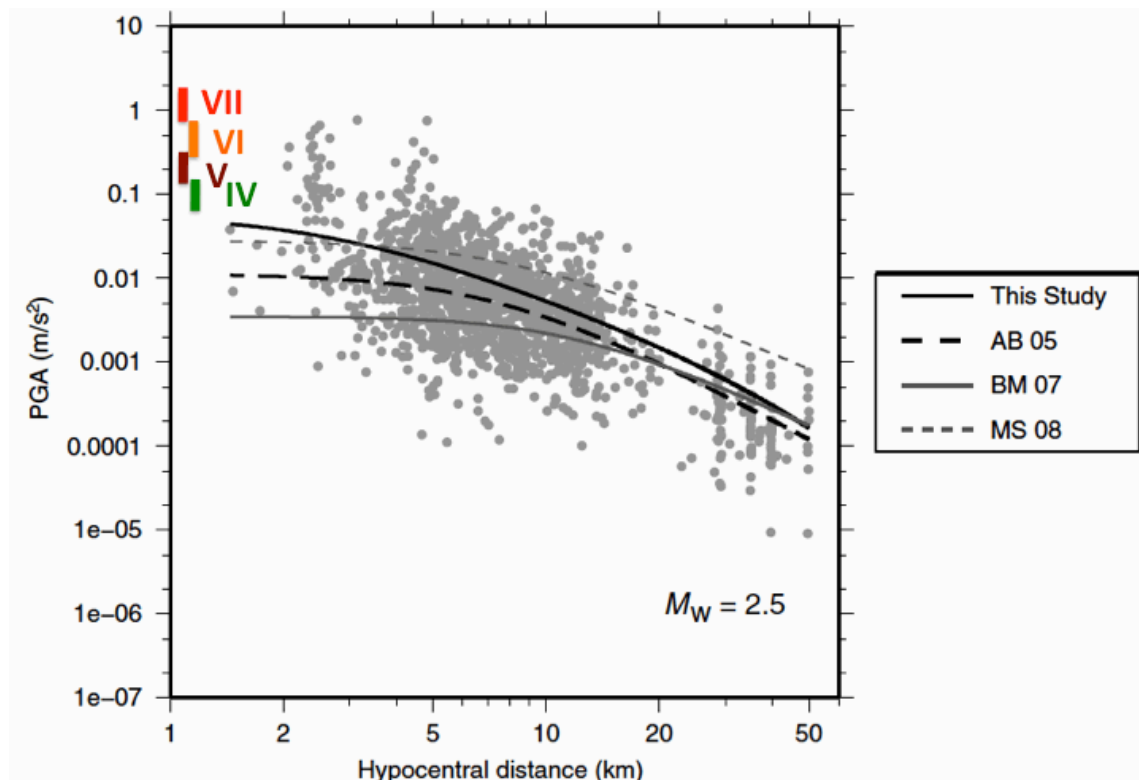


Fig. 7. Aceleração de pico do chão (PGA, *Peak Ground Acceleration*) para sismos de magnitude M_w entre 2 e 3 (pontos em cinza), a distâncias hipocentrais entre 2 e 50 km (Douglas et al., 2013). A curva contínua mais grossa é o melhor ajuste aos dados. Os níveis de aceleração para intensidades IV a VII estão indicados pelas barras coloridas (valores médios aproximados). Note que a distâncias menores que 5 km, há uma pequena probabilidade de ocorrerem acelerações do chão correspondentes a intensidades VI na escala Mercalli Modificada (causando efeitos como aparecimento de pequenas trincas em paredes de casas normais, por exemplo).

4. Conclusões

Ainda não é possível relacionar a ocorrência dos tremores como causa do rompimento das barragens. A probabilidade da coincidência de local e data com o desastre é muito pequena, mesmo considerando que pequenos tremores de terra sejam “relativamente” frequentes no Brasil.

Por outro lado, tremores de terra de pequena magnitude (< 3) só em casos muito especiais poderiam causar danos diretos a qualquer construção civil ou barragem. Essas condições especiais poderiam ser, talvez:

- a) hipocentro bem raso e bem próximo às barragens (difícil de mostrar com a RSBR atual).
- b) barragem já instabilizada por outros fatores anteriores (por exemplo, excesso de carga ou de chuva),
- c) os tremores mais fortes ocorridos às 14hs talvez pudessem ter provocado pequenas fissuras na barragem permitindo leve escoamento de água; os tremores das 16hs podem ter disparado o desastre, numa situação já crítica, acelerando o processo de erosão pelo escoamento inicial da água,
- d) as vibrações dos tremores poderiam ter causado liquefação do material da barragem. Há alguns poucos casos na literatura sobre rompimento de barragens de rejeito por liquefação, mas sempre associados a sismos com magnitude superior a ~ 5 (e.g., Nishihara, 1984).

Cada uma dessas possibilidades precisa ainda ser investigada mais a fundo com estudos técnicos apropriados, antes de se chegar a qualquer conclusão útil.

Uma das dificuldades deste tipo de estudo sismológico, é o pequeno número de estações sismográficas da RSBR, que não permite uma localização mais precisa do epicentro. Obviamente, quanto melhor for a localização dos epicentros, mais fácil seria associar os tremores ao rompimento da barragem ou descartar tal hipótese. Na disposição atual, a RSBR tem 10 estações sismográficas em Minas Gerais, o que é insuficiente para localizar bem tremores de terra pequenos a distâncias de centenas de km.

5. Recomendações

Para aprofundar os estudos da possibilidade de relação dos tremores com o rompimento das barragens da Samarco, seja para mostrar a relação de causa, seja para descartar a influência dos tremores, recomendamos:

- a) Estudo das probabilidades de ocorrência de pequenos tremores na região da mineração. Isso pode ser feito com base na série histórica de sismos do passado.
- b) Estudo geotécnico dos efeitos das vibrações numa barragem de terra como as da Samarco. Pode-se levar em conta as equações de GMPE (“Ground Motion Prediction Equations”) de Douglas et al.(2013) testadas com dados de pequenos sismos do Brasil, ou usando equações desenvolvidas por Drouet & Assumpção (2013; 2015) para o Brasil. As modelagens da resposta da barragem teria de ser feita por outros especialistas.
- c) Rede RSBR: Para melhorar a localização de tremores de interesse geotécnico no Brasil é preciso aumentar o número de estações sismográficas e assim melhorar a cobertura da rede no território nacional. Atualmente, a RSBR opera por esforços individuais de quatro universidades (USP, UnB, UFRN e Observatório Nacional) sem um apoio institucional próprio.

6. Referências

- Agurto-Detzel, H., M. Assumpção, M.B. Bianchi, and M. Pirchiner, 2015. Intraplate seismicity in mid-plate South America: correlations with geophysical lithospheric parameters. *Geological Society, London, Special Publications on "Seismicity, Fault Rupture and Earthquake Hazards in Slowly Deforming Regions"*, 432, published on November 2, 2015, doi:10.1144/SP432.5.
- Assumpção, M., T. H. Yamabe, J. R. Barbosa, V. Hamza, A. E. V. Lopes, L. Balancin, & M. B. Bianchi, 2010. Seismic activity triggered by water wells in the Paraná Basin, Brazil, *Water Resour. Res.*, 46, W07527, doi:10.1029/2009WR008048.
- Assumpção, M., J. Ferreira, L. Barros, F.H. Bezerra, G.S. França, J.R. Barbosa, E. Menezes, L.C. Ribotta, M. Pirchiner, A. Nascimento, J.C. Dourado, 2014. Intraplate Seismicity in Brazil. In *Intraplate Earthquakes*, chapter 3, ed. P. Talwani, Cambridge U.P., ISBN 978-1-107-04038-0.
- Douglas, J., B. Edwards, V. Convertito et al., 2013. Predicting ground motion from induced earthquakes in geothermal areas. *Bull.Seism.Soc.Am.*, 103 (3), 1875-1897. doi: 10.1785/0120120197.
- Drouet & Assumpção (2013). Spectral analysis of Brazilian data and comparison with ground-motion models, *13th SBGF, 26-29 August 2013, Rio de Janeiro, Brazil*. Extended abstract.
- Drouet, S., M. Assumpção, 2015. Source, attenuation and site parameters from spectral analysis of Brazilian earthquakes. *XV Simp. Nacional de Estudos Tectônicos, SNET, Vitória, ES*, Extended Abstract.
- Nishihara, K., 1984. Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of pond deposit. *Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Paper 13.

Centro de Sismologia da USP: <http://www.sismo.iag.usp.br>