

Referências

1. B. Gutenberg, "On microseisms", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 26(2), 111–117 (1936).
2. K. Hasselmann, "A statistical analysis of the generation of microseisms", *Rev. Geophys.* 1(2), 177–210, doi:10.1029/RG001i002p00177 (1963).
3. M. S. Longuet-Higgins, "A theory of the origin of microseisms", *Philos. Trans. Royal Soc. A* 243(857), 1–35, doi:10.1098/rsta.1950.0012 (1950).
4. B. Gutenberg, "Microseisms and Weather Forecasting", *J. Atmospheric Sci.* 4, 21–28, doi:10.1175/1520-0469(1947)004<0021:MAWF>2.0.CO;2 (1947).
5. A. Friedrich, F. Krüger, e K. Klinge, "Ocean-generated microseismic noise located with the Gräfenberg array", *J. Seismol.* 2, 47–64, doi:10.1023/A: 1009788904007 (1998).
6. P. D. Bromirski, R. E. Flick, e N. Graham, "Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific", *J. Geophys. Res.: Oceans* 104(C9), 20,753–20,766, doi: 10.1029/1999JC900156 (1999).
7. I. Grevemeyer, R. Herber, e H.-H. Essen, "Microseismological evidence for a changing wave climate in the northeast Atlantic ocean", *Nature* 408(6810), 349–352, doi:10.1038/35042558 (2000).
8. C. Davy, G. Barruol, F. R. Fontaine, K. Sigloch, e E. Stutzmann, "Tracking major storms from microseismic and hydroacoustic observations on the seafloor", *Geophys. Res. Lett.* 41(24):8825 – 8831 (2014).
9. N. M. Shapiro, e M. Campillo, "Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise", *Geophys. Res. Lett.* 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491 (2004).
10. G. Silveira, N.A. Dias, e A. Villaseñor, "Seismic imaging of the Western Iberian Crust using ambient noise: boundaries and internal structure of the Iberian Massif", *Tectonophysics* 589, 186-194, doi:10.1016/j.tecto.2012.12.025 (2013).
11. C. Matos, C., G. Silveira, L. Matias, R. Caldeira, L. Duarte, N. A. Dias, F. Krueger, e T. Santos, "Upper crustal structure of Madeira Island revealed from ambient noise tomography", *J. Volcanol. Geotherm. Res.* doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.03.017 (2015).
12. C. Corela, G. Silveira, L. Matias, M. Schimmel e W. H. Geissler, "Ambient seismic noise tomography of SW Iberia integrating seafloor- and land-based data", *Tectonophysics* 700-701, 131–149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.02.012> (2017).
13. A. Domingues, A., G. Silveira, A. Ferreira, S.-J. Chang, S. Custódio, e J. Fonseca, "Ambient Noise Tomography of the East Africa Rift in Mozambique", *Geophys. J. Int.* 204 (3): 1565-1578, doi 10.1093/gji/ggv538 (2016).
14. A. Haned, E. Stutzmann, M. Schimmel, S. Kiselev, A. Davaille, e A. Yelles-Chaouche, "Global tomography using seismic hum", *Geophys. J. Int.* 204, 1222-1236, doi: 10.1093/gji/ggv516 (2016).
15. C. Sens-Schönfelder e U. Wegler, "Passive Image Interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi volcano, Indonesia", *Geophys. Res. Lett.* 33, no. 21, L21302, doi:10.1029/2006GL027797 (2006).
16. F. Brenguier, N.M. Shapiro, M. Campillo, V. Ferrazzini, Z. Duputel, O. Coutant, e A. Nercessian, "Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise", *Nat. Geosci.* 1, pp. 126-130, 10.1038/ngeo104 (2008).
17. F. Brenguier, D. Clarke, Y. Aoki, N.M. Shapiro, M. Campillo, e V. Ferrazzini, "Monitoring volcanoes using seismic noise correlations", *Compt. Rendus Geosci.* 343, pp. 633-638, 10.1016/j.crte.2010.12.010 (2011).
18. F. Brenguier, M. Campillo, T. Takeda, Y. Aoki, N. Shapiro, X. Briand, K. Emoto, e H. Miyake, "Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops", *Science* 345(6192), 80–82 (2014).
19. G. Mainsant, E. Larose, C. Brönnimann, D. Jongmans, C. Michoud, e M. Jaboyedoff, "Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction", *J. Geophys. Res.* 117, F01030, doi:10.1029/2011JF002159 (2012).
20. C. Voisin, S. Garambois, C. I. Massey e R. Brossier, "Seismic Noise Monitoring of the Water Table in a Deep Seated Slow Moving Landslide". *Interpretation* 4, 3, pp SJ67-SJ76 (2016).
21. M. Lehujeur, J. Vergne, A. Maggi e J. Schmittbuhl, "Ambient noise tomography with non-uniform noise sources and low-aperture networks: case study of deep geothermal reservoirs in Northern Alsace, France", *Geophys. J. Int.*, 208 (1), 193-210, doi: 10.1093/gji/ggw373 (2017).
22. A. Obermann, T. Kraft, E. Larose, e S. Wiemer, "Potential of ambient seismic noise techniques to monitor reservoir dynamics at the St. Gallen geothermal site (Switzerland)", *Journal of Geophys. Res.* 120 (6), 4301-4316, doi: 10.1002/2014JB011817 (2015).
23. M. Y. Ali, K. A. Berteussen, J. Small, e B. Barkat, "A study of ambient noise over an onshore oil field in Abu Dhabi, United Arab Emirates", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 100, 392– 401, doi: 10.1785/0120090131 (2010).
24. B. Boullenger, A. Verdel, B. Paap, J. Thorbecke, e D. Draganov, "Studying CO₂-storage with ambient-noise seismic interferometry: a combined numerical feasibility study and field-data example for Ketzin, Germany", *Geophysics* 80, Q1-Q13, doi: 10.1190/geo2014-0181.1 (2015).
25. R. Czarny, H. Marcak, N. Nakata, Z. Pilecki, e Z. Isakow, "Monitoring Velocity Changes Caused By Underground Coal Mining Using Seismic Noise". *Pure Applied Geophys.* 2016, 173.6: 1907-1916. ISSN 0033-4553 (2016).



Graça Silveira é Professora Adjunta no ISEL, na Área Departamental de Física, e investigadora do Lab. Associado IDL. É licenciada e mestre em Ciências Geofísicas pela FCUL e doutorada em Física, ramo Geofísica, pela FCUL. Dedicar-se ao estudo

da estrutura interna da Terra a partir da análise de sinais sísmicos, recorrendo para isso a diferentes metodologias.



Susana Custódio é Professora Auxiliar na FCUL, na área de Geofísica, e investigadora do Lab. Associado IDL. É licenciada em Eng. Física Tecnológica pelo Inst. Sup. Técnico e doutorada em Ciências Geológicas pela Univ. Califórnia, Santa Bárbara.

Dedicar-se à sismologia, com ênfase no estudo das fontes sísmicas, sismologia em tempo real, infraestrutura observacional, e educação e divulgação sobre riscos.



Soluções para medição precisa de radiação solar

Medir com precisão a radiação do Sol é fundamental para identificar localizações ideais para instalações, justificar decisões de investimento, maximizar a eficiência de operação, programar manutenções, monitorizar o desempenho e melhorar a tecnologia em aplicações em energia solar fotovoltaica (PV), energia solar fotovoltaica de concentração (CPV) e energia solar térmica de concentração (CSP).

Na Kipp & Zonen, os nossos especialistas desenvolvem instrumentos de alta qualidade para a medição de radiação solar global, directa, difusa e no plano dos painéis, que permitem saber com precisão se o seu projecto de energia solar está a operar no seu melhor e a atingir o desempenho previsto, assim como fazer a gestão da manutenção. Desde a nossa bem conhecida série CMP, e a inovadora série de piranómetros Smart SMP, até ao novo sistema compacto de monitorização RaZON⁺, nós fornecemos as melhores soluções.

Quando a precisão importa, meça com Kipp & Zonen.

www.kippzonen.com

Kipp & Zonen distribuidor para Portugal
Vórtice - Equipamentos Científicos, Lda.

+351 21 868 35 59 | geral@vortice-lda.pt | www.vortice-lda.pt

Estudo Geofísico e Geológico da Falha de Vila Franca de Xira

João Carvalho¹, Daniela Alves¹, J. Borges², Bento Caldeira², João Cabral³, Ruben Dias¹, João Casacão⁴, Rui J. Oliveira², Jaime Leote¹

¹Unidade Recursos Minerais e Geofísica, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Estrada da Portela-Zambujal, Apartado 7586 - Alfragide, 2610-999 Amadora

²Instituto de Ciências da Terra e Departamento de Física, Universidade de Évora, Colégio Luís António Verney, Rua Romão Ramalho 59, 7002-554 Évora

³Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, e Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa

⁴Galp Energia, Rua Tomás da Fonseca, Torre A Piso 10, 1600-209 Lisboa

(1) joao.carvalho@lneg.pt (2) jborges@uevora.pt; ruio@uevora.pt (3) jcabral@fc.ul.pt (4) joao.casacao@galp.pt

Resumo

A região de Lisboa e Vale Inferior do Tejo foi afetada por vários sismos destrutivos que provocaram grandes prejuízos materiais e perdas de vida. As fontes geradoras desses sismos históricos situam-se quer na zona de fronteira de placas Ibéria-África, localizada cerca de 300 km a sul, quer no interior da própria região. Neste artigo, estuda-se uma falha geológica local, a falha de Vila Franca de Xira, que se julga ter ocasionado o terramoto de Lisboa de 1531. Apesar da ausência de evidência geológica direta para a presença duma rotura superficial da falha, demonstra-se através da utilização de métodos geofísicos que se trata de uma zona de falha ativa, sendo possivelmente a fonte de geração daquele sismo.

Introdução

Lisboa e a região do Vale Inferior do Tejo foram afetadas por vários sismos de magnitude moderada a elevada, que causaram elevados danos materiais e perdas de vidas, como em 1344, 1531, 1755 e 1909 [1,2]. Estes sismos são gerados em falhas geológicas ativas, sendo tanto mais energéticos quanto maior for a dimensão da rotura na falha [3]. Os sismos repetem-se no tempo devido à natureza cíclica do mecanismo de geração em cada falha (ressalto elástico / ciclo sísmico). Embora esta repetição seja frequentemente irregular no tempo, podemos calcular um intervalo de recorrência médio [3]. Este intervalo de recorrência médio pode estimar-se através de um parâmetro da falha sismogénica designado de taxa de deslocamento. Se pudermos medir o deslocamento produzido por uma falha em sedimentos recentes e determinar a idade desses sedimentos, podemos estimar a taxa de deslocamento

como o movimento na falha a dividir pelo tempo. Os métodos geofísicos podem ajudar na determinação do deslocamento, mas a sua datação é bastante mais difícil e incerta. De forma a conhecermos a perigosidade sísmica e o risco sísmico de uma região, é necessário conhecer e caracterizar as falhas geológicas ativas que a podem afetar.

Em inúmeras situações, as falhas geológicas não podem ser reconhecidas à superfície, como sucede na região de estudo. Neste caso são utilizados métodos geofísicos para a sua localização e caracterização. Entre os métodos geofísicos utilizados na deteção de falhas, encontram-se os métodos sísmicos, elétricos e eletromagnéticos. Neste estudo, por oferecerem as resoluções mais elevadas [4], elegeram-se a sísmica de reflexão e o radar de penetração do solo (GPR), método eletromagnético vulgarmente conhecido pela designação georradar. No entanto, como as ondas de georradar são fortemente atenuadas em meios de condutividade elétrica elevada, este método apresenta dificuldades em meios geológicos argilosos em que o nível freático é superficial, como sucede na zona de estudo. Neste trabalho, discute-se a aplicação de métodos geofísicos na caracterização da Falha de Vila Franca de Xira, considerada por alguns autores a falha que gerou o terramoto de Lisboa de 1531 e que causou mais de mil vítimas [1,5,6]. Adquiriram-se e processaram-se dados de sísmica de reflexão com ondas P e S, georradar e geolétricos, tendo sido aberta uma trincheira com cerca de 5 m de profundidade para confirmação da interpretação dos dados.

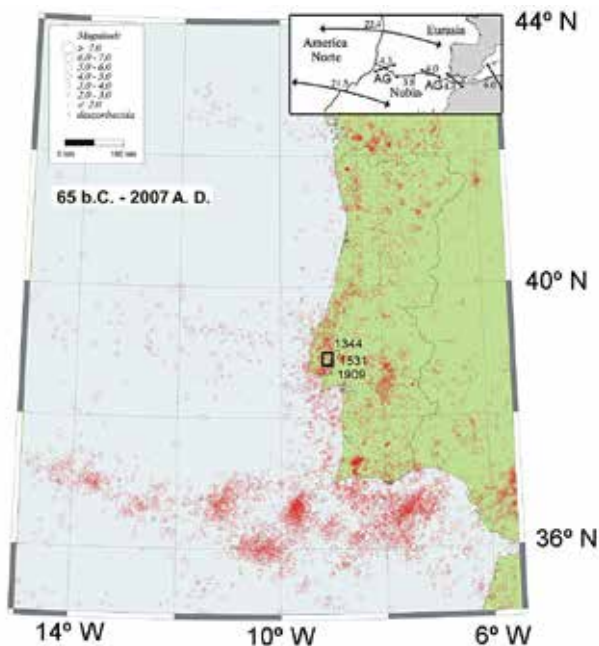


Fig. 1 – Sísmica da zona de estudo entre 65 A.C e 2007 A.D. (@IPMA) e localização da Falha de Vila Franca de Xira e zona de estudo (quadrado). A caixa em cima à direita mostra o enquadramento da zona de estudo no contexto das placas tectónicas e as velocidades de deslocamento relativo entre estas (em mm/ano).

Sísmica de reflexão, geoeletrica e georradar

A sísmica de reflexão é um método geofísico no qual é gerado um pequeno sismo ou vibração do solo (fonte sísmica), que é registado no conjunto de sensores (geofones) dispostos de forma aproximadamente linear sobre a superfície do terreno. As ondas sísmicas, ao encontrarem diferentes camadas geológicas com diferentes impedâncias acústicas (a impedância acústica – IA – é o produto da densidade do meio pela velocidade sísmica de propagação nesse meio), refletem-se, refratam-se e propagam-se através da interface entre os dois meios distintos. Quanto maior a diferença de IA entre os dois meios, maior a amplitude da reflexão. Após o registo de múltiplos sismos em diferentes posições da fonte e dos geofones, os dados são combinados de forma apropriada e eliminadas todas as ondas sísmicas, exceto as refletidas nos diferentes horizontes geológicos, de forma a produzir imagens do subsolo, isto, é da geometria das diversas camadas geológicas e das suas interrupções ou falhas.

O georradar consiste basicamente nos mesmos princípios, mas, em vez de ondas sísmicas,

estuda a propagação de ondas eletromagnéticas, e em vez da amplitude de reflexão destas ondas ser determinada pelas diferenças de IA entre os dois meios, os parâmetros físicos envolvidos são a constante dielétrica (que controla a reflexão) e a condutividade elétrica (que controla a atenuação da amplitude). Uma outra diferença é que a aquisição dos dados no método do georradar utiliza apenas uma fonte e um recetor (antenas) localizados no mesmo ponto espacial, mas que se pode deslocar. Da mesma forma que na sísmica, as imagens produzidas pelo registo das ondas de georradar ao longo de um perfil na superfície por onde se arrastou a antena (que se chamam radargramas), formam representações do subsolo onde são visíveis as superfícies de separação entre camadas que apresentam variações significativas da constante dielétrica.

No método geoeletrico, é injetada uma corrente elétrica no solo e medidos os seus efeitos (variações da diferença de potencial) a várias distâncias do ponto de injeção. A geometria de aquisição, isto é, a posição relativa dos eléctrodos de injeção e medição, depende dos objetivos que se pretendem atingir. Os resultados são posteriormente processados de forma a fornecerem uma imagem das distribuições da resistividade elétrica por diferentes horizontes do subsolo.

Aquisição, processamento e interpretação dos dados geofísicos

Estimada a localização da falha de Vila Franca de Xira na planície aluvial do rio Tejo, onde se encontra oculta por uma cobertura de aluviões recentes, e após um trabalho inicial em V. F. Xira [4] onde a zona de falha foi detetada, planeou-se um conjunto de perfis geofísicos em Castanheira do Ribatejo de acordo com a orientação conhecida da falha em afloramento. Começou-se por adquirir um perfil de sísmica de reflexão com ondas P com uma fonte sísmica capaz de gerar sinal a várias centenas de metros de profundidade, para confirmar a presença da falha sob as aluviões. A secção sísmica obtida, que se apresenta na Figura 2.b, mostra as camadas geológicas deformadas e fraturadas, demonstrando que a zona de falha e as suas ramificações se prolongam para nordeste sob as aluviões, relativamente aos locais onde está reconhecida à superfície, afetando rochas de idade jurássica e miocénica. Identificaram-se assim vários locais onde se detetaram segmentos de falha a pouca profundidade e possivelmente deslocando os sedimentos aluviais recentes, com idade inferior a cerca de 20 mil anos, demonstrando que a falha está ativa, como se supunha.

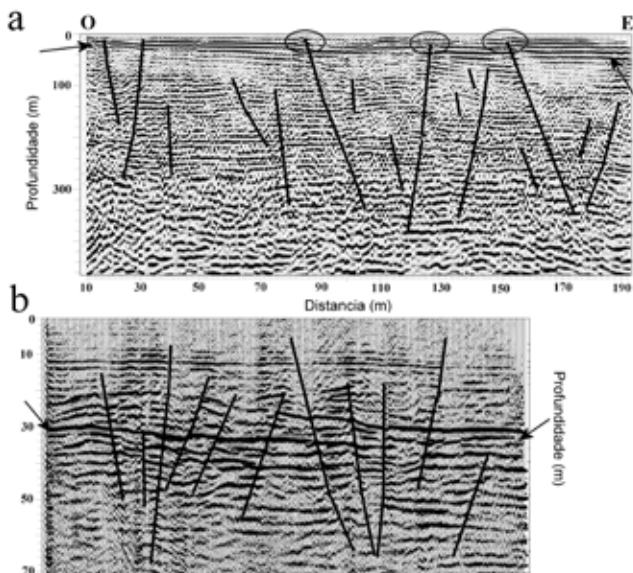


Fig. 2 – Secções sísmicas de ondas P (topo) e ondas S (base) realizadas sobre a falha de V. E. Xira, em Castanheira do Ribatejo, mostrando os vários segmentos e ramificações (linhas verticais a preto) que compõem aquela zona de falha. Os perfis são parcialmente sobrepostos, situando-se o perfil de ondas S cerca de 10 m a oeste. Elipses indicam os locais das trincheiras. Setas indicam base das aluviões.

Nestes locais aplicaram-se métodos elétricos, georradar e sísmica de reflexão com ondas S para verificar se os sedimentos mais recentes estão ou não deformados. A sísmica de reflexão possui uma resolução vertical que é dada aproximadamente pelo comprimento de onda sísmico dividido por quatro. O comprimento de onda sísmico é dado pelo quociente entre a velocidade de propagação sísmica e a frequência do sinal sísmico. Uma vez que a velocidade de propagação das ondas S em sedimentos não consolidados é bastante inferior à velocidade de propagação das ondas P, a sísmica de ondas S oferece uma resolução superior à da sísmica de ondas P. A secção de ondas S obtida (Figura 2.b) permite obter uma resolução vertical de cerca de 0,4 m, o que será suficiente para detetar uma falha cujo deslocamento vertical esperado é de cerca de 1 m a 1,5 m. A geoeletrica, embora de menor resolução, pretende corroborar a interpretação sísmica. O georradar apresenta resolução vertical ligeiramente superior à sísmica, mas a presença de material argiloso na região gera radargramas muito atenuados logo a partir das camadas mais superficiais, o que causa problemas na interpretação destes dados.

A interpretação conjunta dos dados sugeriu a presença de várias ramificações da falha pesquisada ao longo dos perfis. Como se disse atrás e se pode ver nas Figura 2.a e 2.b, os perfis de ondas P e ondas S, respetivamente, apresentam profundidades de deteção e resoluções significativamente diferentes. No perfil de ondas P, a profundidade de deteção é maior, permitindo visualizar ramificações ou segmentos da falha mais profundos, mas a sua resolução é limitada. Algumas ramificações da zona de falha que parecem atingir a superfície neste

perfil não são visíveis no local correspondente no perfil de ondas S, que apresenta profundidades de deteção menores, mas maior resolução. Outras ramificações da falha são claramente coincidentes nos dois perfis e algumas delas parecem afetar a interface (refletor sísmico) situada a 10 m de profundidade visível no perfil de ondas S. Note-se que num ambiente geológico deste tipo, constituído por sedimentos não consolidados e saturados em água que apresentam um comportamento dúctil (plástico), é pouco expectável a ocorrência de superfícies de rotura localizada, mas antes deformação distribuída.

Os resultados de georradar sugerem que essas ramificações da falha possam prolongar-se até a 2-3 m de profundidade, enquanto a sísmica de reflexão e a geoeletrica apontam para perturbações mais evidentes abaixo de 10 m de profundidade (Figura 2). A maior resolução do georradar e a indicação de que algumas ramificações da falha seriam mais superficiais levou a que se decidisse abrir trincheiras nestes locais, com o objectivo de comprovar as interpretações geofísicas.

Trincheiras e dados de ensaios geotécnicos

Foram abertas trincheiras com cerca de 3 m a 5 m de profundidade e 7 m a 10 m de comprimento em três zonas distintas do perfil realizado com ondas P, que se indica na Figura 2. Encontraram-se lodos de cor cinzenta escura, muito plásticos e homogéneos, que terão selado quaisquer roturas de falha que os tenham cortado e deslocado, eventualmente durante o terramoto de 1531 ou outro sismo anterior. A ausência de horizontes estratigráficos de referência detetáveis nas paredes das trincheiras também impediu o reconhecimento de eventuais rejeições verticais. Concluiu-se assim que o georradar não teve capacidade de penetrar abaixo do nível freático conduzindo a uma interpretação errónea. Por outro lado, os resultados da sísmica de reflexão com ondas S mostram uma composição homogénea até cerca de 10 m de profundidade, surgindo aqui uma variação nítida de propriedades também confirmada por ensaios geotécnicos realizados anteriormente no local. Essa interface encontra-se interrompida na secção sísmica em vários locais onde se notam também variações bruscas de velocidade e perturbações nos registos em bruto [7], sugerindo fortemente a presença de várias ramificações da falha afetando as aluviões quaternárias [4].



Fig. 3 – Imagem de uma das trincheiras abertas sobre a Falha de Vila Franca de Xira.

Conclusões

Quando as taxas de deslocamento nas falhas ativas são relativamente baixas e a expressão superficial dessas falhas é obliterada pelos processos morfogénicos superficiais (erosão/sedimentação), conduzindo a uma topografia plana e não propícia à ocorrência de afloramentos geológicos, os métodos de prospeção geofísicos são uma alternativa eficaz para a localização e caracterização dessas falhas ativas ocultas. Como se referiu, a caracterização das falhas geológicas ativas, enquanto fontes sismogénicas, é importante para uma avaliação adequada da perigosidade e risco sísmico regional.

Neste trabalho, procedeu-se a um estudo geofísico da falha de V. F. de Xira na proximidade de Castanheira do Ribatejo. Embora as trincheiras para pesquisa geológica não tenham provado que aquela zona de falha afeta os sedimentos mais superficiais do Holocénico, os resultados geofísicos sugerem fortemente que a falha está ativa, corroborando a proposta de ser muito provavelmente a fonte do sismo de 1531, que causou cerca de mil vítimas.

Referências

1. J. Cabral, C. Moniz, P. Ribeiro, P. Terrinha, e L. Matias, "Analysis of seismic reflection data as a tool for the seismotectonic assessment of a low activity intraplate basin — The Lower Tagus Valley (Portugal)", *Journal of Seismology* 7, 431–447 (2003).
2. J. Carvalho, J., Cabral, R. Gonçalves, L. Torres, e L. Mendes-Victor, "Geophysical Methods Applied to Fault Characterization and Earthquake Potential Assessment in the Lower Tagus Valley, Portugal", *Tectonophysics* 418, 277-297 (2006).
3. D. L. Wells e K. J. Coppersmith, "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(4), 974-1002 (1994).
4. R. Ghose, J. Carvalho, e A. Loureiro, "Signature of fault deformation in near-surface soil visible in shear seismic reflections", *Geophysical Research Letters* 40, 1074-1078 (2013).
5. J. L. Justo e C. Salwa, "The 1531 Lisbon earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America* 88, 319-328 (1998).
6. M. A. Baptista, J. M. Miranda, e J. Batlló, "The 1531 Lisbon earthquake: a tsunami in the Tagus Estuary?", *Bulletin of the Seismological Society of America* 104(5), 2149-2161 (2014).
7. J. Carvalho, R. Ghose, D. Alves, e J. Leote, "Earthquake faulting-related deformation in soil evidenced in S-wave shallow reflection data: field results from Portugal", *Geophysics* 81 (5), IM97-IM108 (2016).