

# Estudo Geofísico e Geológico da Falha de Vila Franca de Xira

João Carvalho<sup>1</sup>, Daniela Alves<sup>1</sup>, J. Borges<sup>2</sup>, Bento Caldeira<sup>2</sup>, João Cabral<sup>3</sup>, Ruben Dias<sup>1</sup>, João Casacão<sup>4</sup>, Rui J. Oliveira<sup>2</sup>, Jaime Leote<sup>1</sup>

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

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

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

<sup>4</sup>Galp 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.

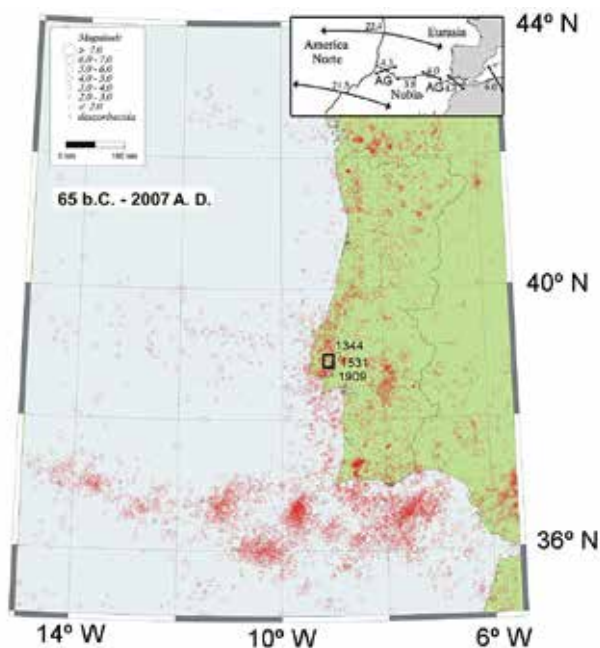


Fig. 1 – Sísmicidade da zona de estudo entre 65 A.C e 2007 A.D. (@IPMA) e localização da Falha de Vila Franca de Xira e zona de estudo (quadrado). A caixa em cima à direita mostra o enquadramento da zona de estudo no contexto das placas tectónicas e as velocidades de deslocamento relativo entre estas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

## Sísmica de reflexão, geoeétrica 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 geoeétrico, 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.

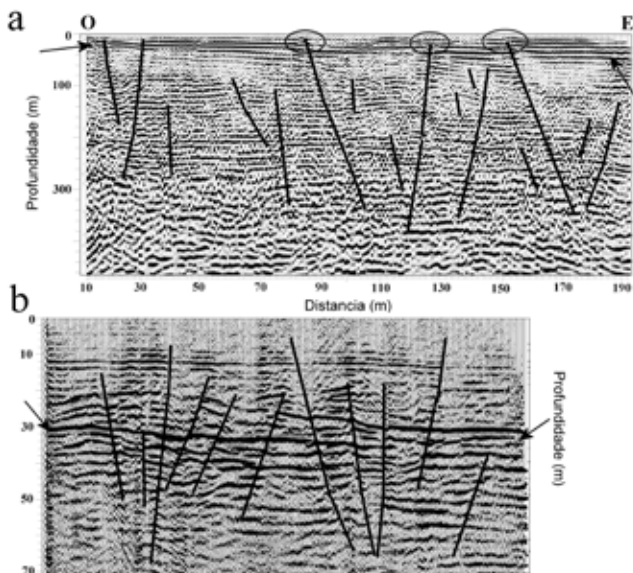


Fig. 2 – Secções sísmicas de ondas P (topo) e ondas S (base) realizadas sobre a falha de V. E. Xira, em Castanheira do Ribatejo, mostrando os vários segmentos e ramificações (linhas verticais a preto) que compõem aquela zona de falha. Os perfis são parcialmente sobrepostos, situando-se o perfil de ondas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





**João Carvalho** possui os graus de Mestre em Ciências Geofísicas e o Doutoramento em Física, ambos na Especialidade de Geofísica Interna pela Universidade de Lisboa. Desde 2013, é Investigador Auxiliar no LNEG, onde tem efetuado o desenvolvimento e aplicação de métodos sísmicos a problemas de Recursos Naturais, Geotecnia, Hidrogeologia, Geotermia e Neotectónica, entre outros. Participou em mais de 30 projetos de investigação científica. Orientou e foi júri de diversas teses de mestrado, doutoramento e pós-doutoramentos, tendo publicado mais de 25 artigos em jornais internacionais e mais de 100 comunicações orais e escritas em encontros científicos nacionais e internacionais.



**Daniela Alves** é licenciada em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica e mestre em Ciências Geofísicas pela FCUL. Em 2011, colaborou pela primeira vez com o LNEG na área da Interferometria Sísmica e Métodos Sísmicos, desde 2013, no projeto *ATESTA – Active Tectonics and Earthquake Scenarios for*

*the Lower Tagus Valley*. Atualmente, encontra-se contratada pelo projeto PLANAGEO, financiado pelo Governo de Angola e no qual participam o LNEG, IGME e Impulso trabalhando com métodos potenciais e radiométricos.



**José Borges** é licenciado e mestre pela FCUL e doutorado em Física pela Univ. Évora, e professor no Dep. Física desta última universidade e investigador no Instituto de Ciências da Terra (ICT - Polo de Évora). Integra equipas de investigação em diversos projetos nacionais e internacionais em áreas como a Sismologia, Perigosidade sísmica, Fonte Sísmica, e Arqueometria, tendo vindo a dedicar especial atenção nos últimos anos à predição de movimentos sísmicos intensos na região do Vale Inferior do Tejo.

logia, Perigosidade sísmica, Fonte Sísmica, e Arqueometria, tendo vindo a dedicar especial atenção nos últimos anos à predição de movimentos sísmicos intensos na região do Vale Inferior do Tejo.



**Bento Caldeira** nasceu em 1960, licenciado e pós-graduado em Física pela Fac. Ciências e Tecnologia da Univ. Coimbra; Mestre e Doutoramento em Física pela Univ. Évora, é professor no Dep. Física da Univ. Évora e investigador no ICT – polo de Évora. Integra vários projetos de investigação nacionais e internacionais

na área da Geofísica Interna (sismologia, risco sísmico e aplicação de métodos geofísicos à arqueologia). Em complemento à atividade no ensino superior e na investigação desenvolve trabalho com professores e estudantes de Física do Ensino Secundário.



**João Manuel Lopes Cardoso Cabral** é Geólogo, Professor Associado com Agregação do Dep. Geologia da FCUL. Foi investigador coordenador do Laboratório de Tectonofísica e Tectónica

Experimental - LATTEX desta Faculdade,

sendo presentemente investigador do Laboratório Associado Instituto D. Luiz. Tem desenvolvido investigação nos domínios da Neotectónica e Sismotectónica desde 1980, primeiro no Gabinete de Proteção e Segurança Nuclear, e depois no âmbito da sua atividade de docente da FCUL. Participou nos Estudos de Seleção de Sítios para Centrais Nucleares no território continental português e no subsequente projeto de elaboração de uma Carta Neotectónica de Portugal Continental. O principal interesse de investigação atual consiste no desenvolvimento de uma base de dados de falhas ativas do território português integrado no contexto geológico da Península Ibérica, em plataforma SIG, com ênfase na quantificação da atividade tectónica recente e aquisição de informação paleossismológica como suportes para avaliação da perigosidade sísmica regional. É autor ou co-autor de numerosas publicações científicas nacionais e internacionais sobre estas temáticas.



**Ruben Pereira Dias**

Coordenador da Unidade de Geologia, Hidrogeologia e Geologia Costeira, Doutoramento em Geodinâmica Interna pela FCUL, desempenha funções como Investigador Auxiliar no LNEG, no âmbito da Cartografia

Geológica do Cenozoico, Neotectónica e Sismotectónica com a identificação e caracterização de estruturas tectónicas ativas em diversas regiões de Portugal continental. É responsável pelo Projeto de Investigação da Infraestrutura Geológica e da Base de Recursos Geológicos - Programa de Cartografia Geológica de Portugal. Tem participado na elaboração de numerosas cartas geológicas, na escala 1/50 000, 1/200 000 e 1/1000000. Participou ainda diversos projetos de investigação científica como coordenador e/ou colaborador na área da cartografia geológica, perigosidade geológica e no património geológico. É co-autor de diversos trabalhos científicos publicados em capítulos de livro, revistas, congressos nacionais e/ou internacionais.



**João Casacão** é licenciado em Geologia e mestre com especialização em Geociências de Petróleo pela FCUL. Colaborou no projeto ATESTA em 2013 pelo Centro de Geofísica de Évora na integração de métodos geofísicos aplicados à

deteção de falhas. Desde então, tem desenvolvido investigação no âmbito de análise e modelação de bacias sedimentares e sistemas petrolíferos, contribuindo para a avaliação de potencial petrolífero. Tem apresentado comunicações científicas em congressos da especialidade, e é palestrante convidado na pós-graduação de Geociências de Petróleo da FCUL e no Mestrado de Eng.<sup>a</sup> de Reservatórios do IST. Atualmente integra a equipa de Exploração da Galp Energia.



**Rui Jorge Oliveira**

nasceu em Águeda em 1985. Licenciado e mestre em Engenharia Geológica pela Univ. Aveiro, atualmente é membro colaborador do ICT – polo de Évora, enquanto aluno de doutoramento em Ciências da

Terra e do Espaço. A investigação que desenvolve está centrada no estudo de metodologias eficazes de prospeção geofísica em ambiente arqueológico e no estudo de técnicas de modelação e inversão de dados geofísicos. Desde 2013, tem participado como bolseiro em diversos projetos de investigação na área da Geofísica Aplicada.



**Jaime Manuel dos Santos Leote do Rego**

é Assistente Técnico no LNEG. Possui frequência da Licenciatura em Geologia e participou nos seguintes projetos: NEFITAG; SCENE; ATESTA; SISMOD / LISMOT; SismoTecto; ERSTA;

SHELT; CAPSA; AMBINISA; E-Geo; SONDMIO; Geomist; Carta Radiométrica Nacional. Coautor de cerca de 9 jornais e revistas internacionais com revisão científica, e coautor de capítulo de um livro.