

# Métodos geofísicos de exploração aplicados ao estudo da perigosidade sísmica

João Carvalho<sup>a</sup> & Ruben Pereira Dias<sup>b</sup>

Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Estrada da Portela, Apt. 7586 – Zambujal, Alfragide 2721-866 amadora

a – joão.carvalho@lneg.pt; b – ruben.dias@lneg.pt

## Resumo

Nas últimas décadas os métodos geofísicos ganharam papel de relevo na avaliação da perigosidade, do risco sísmico e na sua mitigação. A detecção de falhas activas em ambientes intra placa onde as taxas de movimentação são relativamente baixas (<0,3 mm/ano) e as roturas superficiais são obliteradas pela erosão e sedimentação, levaram à utilização daqueles métodos na investigação paleossismológica. A nível da mitigação, em que a avaliação dos efeitos de sítio é essencial, é necessário um conhecimento das propriedades mecânicas das primeiras dezenas de metros da sub-superfície e da estrutura das bacias sedimentares, que são obtidos a partir de sondagens geotécnicas e métodos geofísicos.

A utilização dos métodos sísmicos, eléctricos e electromagnéticos na identificação de falhas e na estrutura do subsolo, a delimitação de bacias a partir de métodos potenciais e a caracterização das propriedades mecânicas do subsolo são analisadas no presente trabalho, com exemplos de aplicação em Portugal.

**Palavras-chave:** Geofísica; neotectónica; falhas activas; perigosidade.

## Abstract

*In the last decades geophysical methods have gained an outstanding role in seismic hazard and risk evaluation and its mitigation. In intraplate tectonic environments where slip rates are low (<3 mm/year) and surface ruptures are easily erased by erosion and sedimentation, active fault location is a challenging task. These problems showed the possibility of the application of geophysical methods to identify appropriate locations for trench opening and paleoseismological studies. For seismic risk mitigation, site effects studies are an important issue and the information on the mechanical properties of the shallowest 30 m, together with the information of the sedimentary basins deep structure, are needed. Both tasks require the use of geotechnical soundings and geophysical methods.*

*The use of seismic, electrical and electromagnetic methods in fault location studies and the underground structure, the sedimentary basins delimitation from potential field methods and the mechanical properties characterization of the shallow subsoil using geophysical methods are analysed in the present paper, with several applied examples from Portugal.*

**Key-words:** *Geophysics; neotectonic; active faults; hazard.*

## I. Introdução

A avaliação e mitigação da perigosidade e risco sísmico requerem o conhecimento da estrutura geológica e das propriedades do subsolo. A utilização de métodos geofísicos é por isso fundamental nessa análise. A identificação, localização e caracterização das estruturas tectónicas activas é feita através de estudos de paleossismologia, onde são medidas e datadas as rupturas encontradas no Pliocénico superior –

Quaternário (assumimos este intervalo para definir uma estrutura tectónica activa). Estes dados, conjuntamente com a determinação do comprimento e largura da falha, permitem estimar a magnitude do sismo máximo espectável e o intervalo de recorrência.

Em zonas intraplaca, onde se inclui, a exemplo, Portugal, a região do *Graben* do Reno ou a Mongólia, as taxas de deslizamento são relativamente reduzidas (taxas inferiores a 0,2 mm/ano, com excepção da falha de Manteigas, Vilariça, Bragança – 0,5 mm/ano, em

Portugal) (Cabral, 1995), o que torna difícil a sua identificação através de estudos geológicos de superfície. Nestas regiões é necessário utilizar métodos geofísicos de forma a determinar os locais favoráveis à abertura de trincheiras. Até em zonas com maiores taxas de deslizamento, como a Califórnia ou o Japão, existem, às vezes, falhas cegas (sem rotura superficial) que não produzem sismicidade instrumental e que, por isso, não são reconhecidas até ao momento em que geram, subitamente, um sismo destrutivo (Quigley *et al.*, 2012).

Por este motivo, são necessários realizar estudos profundos de forma a identificar as estruturas sismogénicas e, também, estudos superficiais de alta resolução de modo a verificar a presença e caracterizar as falhas activas no Plio-Quaternário.

De forma a identificar falhas importantes e profundas, diversos métodos podem ser aplicados, caso as falhas apresentem bons contrastes das propriedades dos materiais entre os dois blocos da falha. Gravimetria, magnética, sísmica de reflexão, tomografia, interferometria sísmica são alguns exemplos. Para a localização de falhas mais superficiais, podem utilizar-se métodos como a sísmica de reflexão, tomografia sísmica ou eléctrica, métodos eléctricos, electromagnéticos e georadar. Métodos sísmicos mais recentes como a análise de ondas superficiais (*MASW-multi-channel analysis of surface waves*) ou ondas guiadas têm, também, sido aplicados (Shtivelman *et al.*, 2005).

O método mais adequado a aplicar depende das condições geológicas e hidrogeológicas. O método georadar possui uma excelente resolução (Liner & Liner, 1997) em zonas em que o nível freático é superficial ou em zonas argilosas. O conteúdo de água leva à obtenção de resultados relativamente pobres. O mesmo sucede com os métodos eléctricos e electromagnéticos e, que possuem menor resolução do que o georadar. A MASW apresenta, às vezes, problemas quando existem inversões de velocidade ou situações particulares na distribuição das velocidades e espessura das camadas em profundidade.

Talvez o método mais adequado e aplicável de forma mais abrangente seja a metodologia da sísmica de reflexão, que tem sido utilizada sistematicamente (Catchings *et al.*, 1998; Shtivelman *et al.*, 1998; Floyd *et al.*, 2001; Williams *et al.*, 2001; Sato *et al.*, 2002). Em particular, a sísmica com ondas de corte, possui uma resolução superior e maior sensibilidade às variações laterais em relação ao das ondas P, especialmente em sedimentos não consolidados (Ghose & Goudswaard, 2004). Nas últimas duas décadas assistimos a grande número de aplicações nesta problemática (Goforth & Hayward, 1992; Woorely *et al.*, 1993, 1996; Harris *et al.*, 2000; Ghose & Goudswaard, 2004; Wang *et al.*, 2004; Pugin *et al.*, 2004, 2009).

Em relação à mitigação sísmica, em que importa caracterizar as propriedades mecânicas dos sedimentos mais superficiais, obter mapas de classificação de solo e estimar os efeitos de sítio, os métodos sísmicos levam clara vantagem. Particularmente aqueles que permitem obter a velocidade das ondas de corte e a partir da qual é possível estimar as propriedades elásticas do subsolo e caracterizá-lo do ponto de vista dinâmico. Entre os métodos sísmicos, MASW ou sísmica de refração são os que mais vezes têm sido empregues, devido aos custos relativamente reduzidos e facilidade de aquisição/interpretação.

Apresentamos de seguida exemplos de aplicação de alguns destes métodos em Portugal quer na detecção de falhas quer em mapas de classificação de solos. Apresentamos o exemplo de um estudo de caracterização de falhas activas na região do Algarve, com base na sísmica de reflexão com ondas P e electromagnética e a elaboração de um mapa de classificação de solos para essa região com base na sísmica de refração. Seguidamente, ilustra-se um exemplo de aplicação do método da sísmica de reflexão com ondas S na localização de segmentos de falha superficiais e descreve-se a elaboração de modelo estrutural/velocidades para a região do Vale Inferior do Tejo com recurso à sísmica de reflexão, magnética e gravimetria, que permite estimar os efeitos de sítio na referida zona.

## 2. Perigosidade e mitigação do risco sísmico da região do Algarve

Com vista ao estudo de perigosidade sísmica e à sua mitigação, têm vindo a ser efectuados trabalhos de geologia de superfície na região do Algarve, com vista à identificação das estruturas geológicas activas (Dias, 2001; Dias & Cabral, 2002; Ressurreição, 2009). Nas zonas onde não ocorrem afloramentos que permitam o estudo das falhas, torna-se necessário confirmar a sua localização e identificação através de métodos geofísicos.

A metodologia usual consiste em duas fases distintas: primeiro, efectuar perfis eléctricos ou electromagnéticos e sísmicos com uma resolução espacial mais grosseira, com custos mais reduzidos; de seguida, sobre as estruturas anómalas detectadas, efectua-se perfis sísmicos com maior resolução.

De forma a proceder à caracterização em profundidade das falhas de Carcavai, Santo Estêvão e S. Marcos-Quarteira, efectuaram-se diversos perfis sísmicos de reflexão, geoelectricos e electromagnéticos.

Na mitigação do risco sísmico foram efectuados perfis sísmicas de refração, de modo obter as velocidades de propagação das ondas sísmicas à sub-superfície e com auxílio de dados geotécnicos proceder à elaboração de um mapa de caracterização de solos.

## 2.1 Estudo com sísmica e electromagnética na Falha de Carcavai

A falha de Carcavai é uma estrutura tectónica de direcção NE-SW, com uma extensão de aproximadamente 20 km entre S. Brás de Alportel (Norte) e Quarteira (Sul) apresentando geometria de desligamento esquerdo com componente inversa (Dias, 2001; Dias & Cabral, 2002; Ressurreição, 2009). Está

localizada perto da cidade de Loulé (Fig. 1). Ao longo do seu traçado, existem diversas evidências de deformação nos sedimentos plio-quadernários. É, portanto, considerada uma falha activa e poderá ser uma fonte provável para o sismo de Loulé de 1856 (Ressurreição, 2009), que atingiu intensidade VIII. Pereira de Sousa (1919), considera que o epicentro deste sismo terá sido no Algarve Oriental, porque foi na cidade de Tavira que se sentiu com mais intensidade.

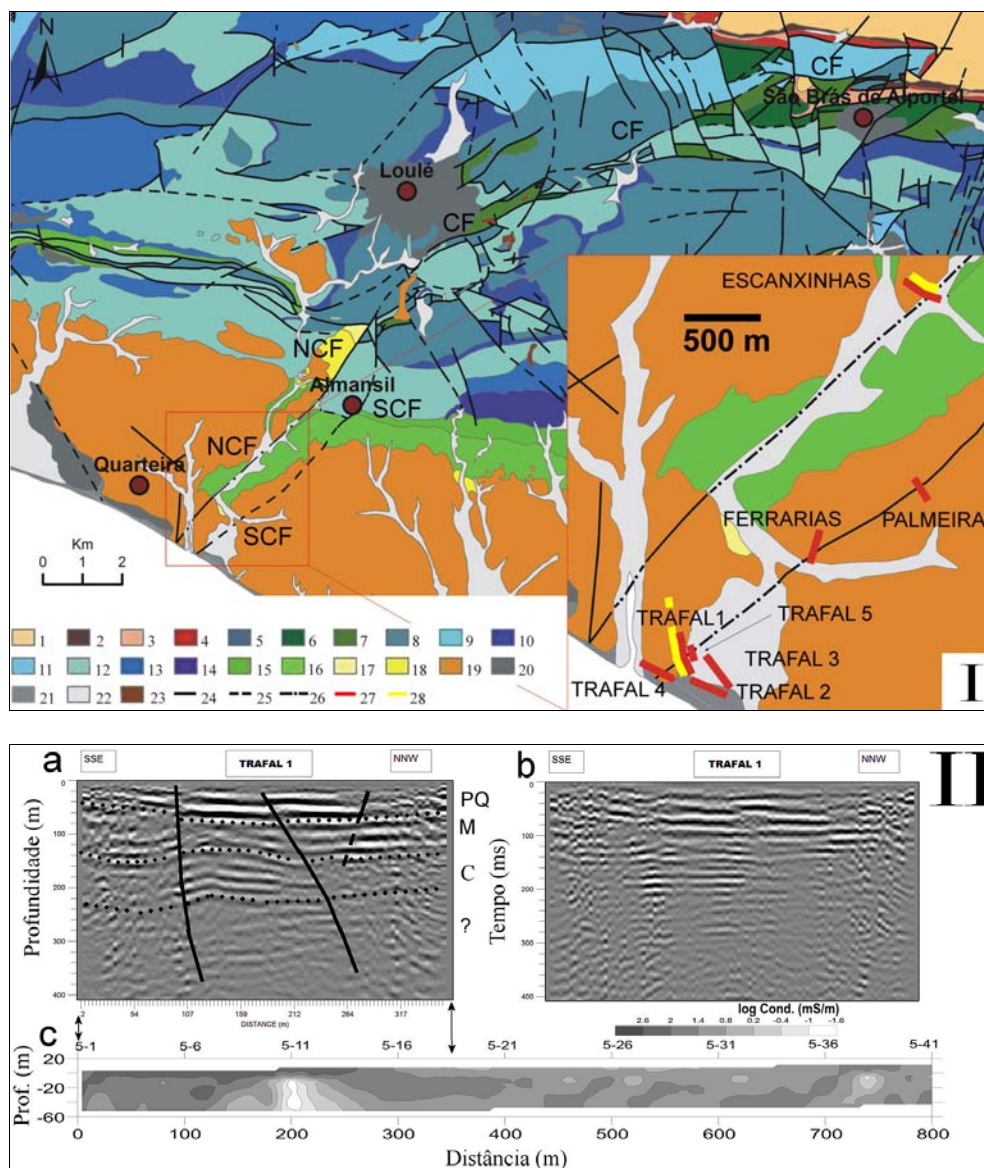


Figura 1 – I: localização dos perfis de reflexão efectuados para o estudo da falha de Carcavai (adaptado de Ressurreição, 2009, *in* Carvalho *et al.*, 2012). CF, falha de Carcavai; NCF, ramo Norte da falha de Carcavai; SCF, ramo Sul da falha. I, Paleozóico; 2, Triásico; 3 a 14, Jurássico; 15 e 16, Cretácico; 17 e 18, Miocénico; 19, Plio-Plistocénico; 20 a 22, Quaternário; 23, rochas vulcánicas; 24, falha; 25, falha provável; 26, falha oculta; 27, perfis sísmicos; 28, perfis EM. II: exemplo de perfil sísmico e EM (Trafal 1). a) perfil sísmico convertido para profundidade; b) perfil sísmico migrado no tempo; c) modelo de inversão da condutividade eléctrica (mS/m) do perfil EM. O perfil sísmico sobrepõe-se parcialmente ao perfil EM (setas duplas). O perfil convertido para profundidade mostra a interpretação estrutural e estratigráfica. Linhas contínuas a preto indicam as falhas interpretadas. PQ, Plio-Quaternário; M, Miocénico; C, unidades do Cretácico.

Nalguns locais, onde a posição da falha era ainda incerta, efectuaram-se diversos perfis de geofísica de forma a estudar a sua geometria em profundidade. Para reduzir custos, realizaram-se primeiros perfis de electromagnética e sísmica de reflexão com menor resolução lateral para localizar a falha. Posteriormente adquiriram-se perfis de sísmica de reflexão com maior resolução lateral e vertical de forma estudar a falha em pormenor.

Os diversos perfis, cuja localização se indica na figura 1 e de que se ilustra um exemplo na mesma figura, mostram deformação nos sedimentos plio-quadernários compatíveis com o conhecimento em afloramento, que confirmam a presença da falha nos locais esperados. Estimou-se também o rejeito vertical numa das falhas em cerca de 10 m com um erro de cerca de 3 m, o que concorda razoavelmente com o valor estimado noutros locais de cerca de 20 m (Ressureição, 2009; Ressureição *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2012).

## 2.2 Elaboração de um mapa de classificação de solos

É usual em regiões sísmicas proceder à elaboração de mapas de classificação de solos, com vista a determinar o nível de reforço das estruturas de engenharia mais importantes. Existem a nível mundial duas classificações principais. Na Europa utiliza-se o Eurocódigo 8 enquanto nos Estados Unidos da América é aplicada a NEHRP (*National Earthquake Hazards Reduction Programme*).

As duas classificações são muito semelhantes e baseiam-se na obtenção da velocidade média de propagação das ondas S nos primeiros 30 m da subsuperfície ( $VS_{30}$ ). Existem diversas formas para obter o  $VS_{30}$ . Análise simples ou multicanal das ondas sísmicas superficiais, *borehole logging* ou refração sísmica. A primeira é uma técnica económica e fácil de aplicar embora não tenha uma resolução elevada. A segunda possui óptima resolução mas além de mais dispendiosa, pois implica a realização de furos, é pontual e não tem em conta a variedade lateral importante que caracteriza a velocidade de corte dos materiais superficiais (Ghose & Goudswaard, 2004).

A sísmica de refração é uma solução de compromisso entre as duas técnicas em termos de resolução e é também económica e facilmente aplicável. Existem múltiplos métodos de interpretação disponíveis (Turesson, 2007), entre os quais, o método da recíproca generalizada (MRG, Palmer, 1980) seja talvez o mais sólido. Existem outros métodos baseados na inversão dos dados (tomografia) que são também bastante utilizados.

Para o Algarve usou-se para a obtenção do  $VS_{30}$  a técnica da sísmica de refração interpretada pelo *intercept-time method* (ITM) e o MRG (Carvalho

*et al.*, 2008, 2009b). Utilizou-se também nesta interpretação e no cálculo do  $VS_{30}$ , os dados de sondagens geotécnicas e furos de captação de água (*id*). A tabela de classificação de solos utilizada, baseada na original de Penelis (1997) (Eurocódigo 8), utiliza também dados de SPT para determinação do *bedrock* (Tabela 1). Na figura 2 mostra-se o mapa de classificação de solos obtido.

CLASSE	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2
Classe A	Rocha ou formação geológica caracterizada por $V_s \geq 800$ m/s.	Depósitos compactos de areias, cascalheiras ou argilas consolidadas, com dezenas de m de espessura ( $V_s \geq 400$ m/s a 10 m de profundidade).
Classe B	Depósitos mais profundos de areias densidade média, cascalheiras ou argilas compactas com dezenas ou centenas de m de espessura ( $V_s \geq 200$ m/s a 10 m prof. a $V_s \geq 350$ m/s a 50 m profundidade (SPT $N \sim 60$ )).	
Classe C	Depósitos não consolidados com ou sem camadas consolidadas moles ( $V_s < 200$ m/s a prof. $< 20$ m (SPT $N < 10$ )).	Depósitos de solos com coesão média a rijia ( $V_s < 200$ m/s a prof. $< 20$ m (SPT $N < 10$ )).

Tabela 1 – Critérios usados na classificação de solos baseada no Eurocódigo 8 (Penelis, 1997).  $V_s$ : velocidade das ondas de corte; SPT N: parâmetro N (nº de pancadas) do standard penetration test.

## 3. Caso estudo da Falha de Vila Franca de Xira e Modelo 3D para o Vale Inferior do Tejo

A zona de falha de V. Franca de Xira de direcção NNE-SSW, com uma zona de deformação larga, tem cerca de 25 km de extensão e passa próximo à cidade que lhe deu o nome (Cabral *et al.*, 2003). Encontra-se parcialmente oculta sob a cobertura aluvionar do Tejo mas aflora numa extensão de cerca de 5 Km a sul de Vila Franca de Xira como uma falha inversa muito inclinada colocando em contacto tectónico por cavalgamento as rochas do Jurássico Superior, a Oeste, sobre sedimentos do Miocénico (Tortoniano), a Este (Cabral *et al.*, 2003; Moniz, 2010). A sul, a estrutura é intersectada por uma falha transversal de direcção NW-SE, possivelmente a falha de Porto Alto (Carvalho *et al.*, 2006) e mais a Sul, é deslocada aparentemente para Este sob os sedimentos da planície aluvial do Tejo através de um salto esquerdo.

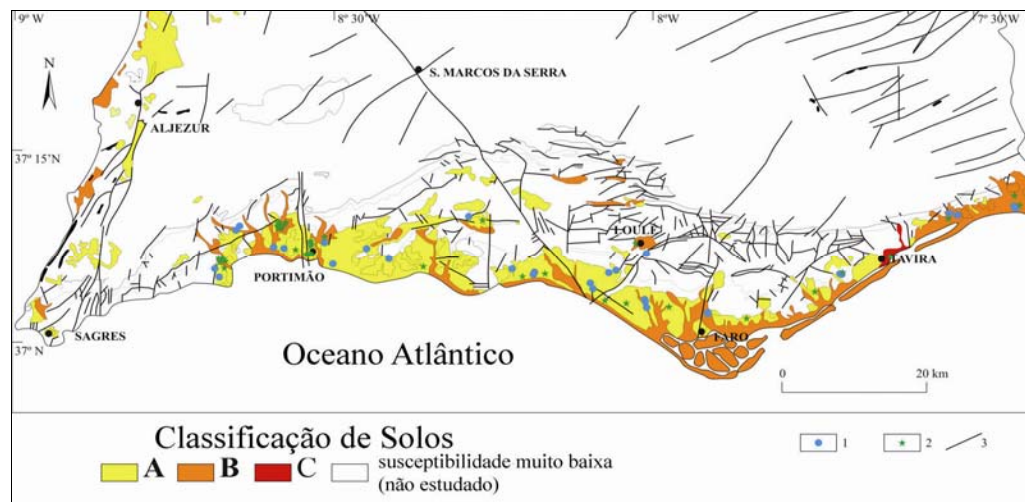


Figura 2 – Mapa de classificação de solos da região do Algarve (adaptado de Carvalho *et al.*, 2008). I, sondagem geotécnica; 2, perfis de refração; 3, falha.

Tem sido considerada por vários autores como fonte possível do sismo de 1531, que causou importantes estragos em Lisboa (Justo & Salwa, 1998) e tem sido alvo de diversos estudos de forma a confirmar se a estrutura tectónica está activa. Foram efectuados diversos perfis com reflexão de ondas P sob a cobertura aluvionar a Norte de Vila Franca de Xira. Os resultados mostraram a existência de duas falhas sob a cobertura holocénica mas por falta de resolução não foi possível confirmar se aquela unidade tinha sido afectada.

Alguns anos mais tarde, em 2008, sobre os locais onde tinham sido anteriormente detectadas as duas falhas, adquiriram-se um perfil de reflexão com ondas P e outro com ondas S, de maior resolução lateral e vertical do que os anteriores (Carvalho *et al.*, 2009a). O processamento e interpretação dos resultados, apoiados pela existência de sondagens geotécnicas e furos de captação de água a algumas centenas de metros dos dois extremos do perfil, sugerem fortemente que as duas falhas detectadas afectam os sedimentos holocénicos até muito perto da superfície, mostrando deste modo que a estrutura tectónica está activa (*id.*). Na figura 3 mostram-se os dois perfis efectuados, com a interpretação de falhas sobreposta.

Outro exemplo de aplicação do método da sísmica de reflexão e dos métodos potenciais consiste na elaboração de um modelo 3D estrutural e de propriedades para a região do Vale Inferior do Tejo (VIT). Esse modelo, para além de identificar as principais estruturas com potencial sismogénico da região (posteriormente confirmadas por estudos geológicos e geofísicos de alta resolução), serve de *input* para programas que calculam os movimentos fortes do solo perante a ocorrência de um sismo permitindo estimar os efeitos de sítio. Quando comparados com os dados de intensidade sísmica, estes estudos podem levar à identificação das fontes sismogénicas de alguns eventos históricos.

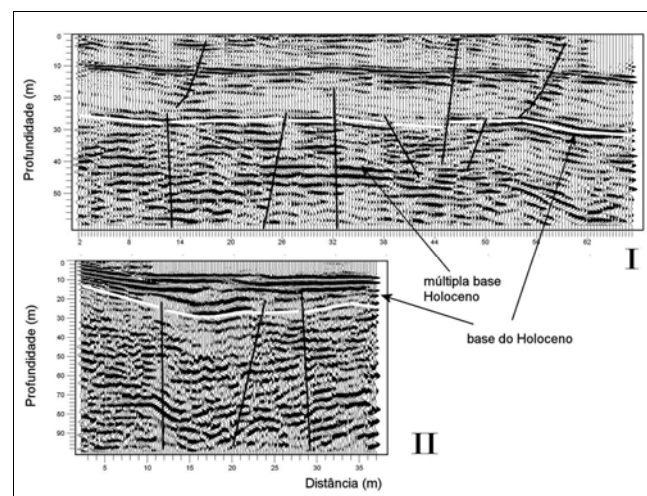


Figura 3 – Perfis sísmicos de reflexão de alta resolução efectuados na cobertura aluvionar sobre a falha de Vila Franca de Xira, convertido para profundidades com as velocidades do processamento. Sobreposta apresenta-se a interpretação estrutural e estratigráfica. I: perfil de ondas S. II: perfil de ondas P.

O modelo estrutural e propriedades para o VIT foi construído a partir dos dados de sísmica de reflexão adquiridos para a indústria petrolífera entre 1950 e 1982, dados de sondagens, dados aeromagnéticos e gravimétricos. A partir dos dados de sísmica e sondagens (Carvalho *et al.*, 2005) construíram-se mapas dos horizontes geológicos que exprimem variações importantes na velocidade de propagação das ondas longitudinais e das densidades das rochas (Carvalho *et al.*, 2005; Pinto *et al.*, 2010; Pinto, 2011). A partir da modelação 2D1/2 gravimétrica e magnética constrangida por dados geológicos, sísmicos e sondagens determinaram-se nas zonas sem cobertura sísmica, mapas estruturais do topo do Paleozóico (modelação magnética) e do topo do Mesozóico (modelação gravimétrica).



- for the seismotectonic assessment of a low activity intraplate basin- the Lower Tagus Valley (Portugal). *Journal of Seismology*, 7: 431-447.
- Carvalho, J., Cabral, J., Gonçalves, R., Torres, L. & Mendes-Victor, L. (2006) – Geophysical Methods Applied to Fault Characterization and Earthquake Potential Assessment in the Lower Tagus Valley, Portugal. *Tectonophysics*, 418(3-4): 277-297.
- Carvalho, J., Dias, R., Pinto, C., Ressurreição, R., (2012) – A Geophysical Study of the Carcavai Fault Zone, Portugal. *Pure and Applied Geophysics*, 169: 183-200, DOI 10.1007/s00024-011-0318-y.
- Carvalho, J., Ghose, R., Pinto, C. & Borges, J. (2009a) – Characterization of a Concealed Fault Zone Using P and S-wave Seismic Reflection Data. *Extended Abstracts of the EAGE Near Surface 2009/15Th Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Dublin, Ireland, 7-9 September, A14, 5 p.
- Carvalho, J., Matias, H., Torres, L., Pereira, R., Manuppella, G. & Mendes-Victor, L. (2005) – Reinterpretation of seismic and well data from the Lusitanian Basin, Portugal – implications to its structural and sedimentary evolution. *Marine & Petroleum Geology*, 22(3): 427-453.
- Carvalho, J., Torres, L., Castro, R., Dias, R. & Mendes-Victor, L. (2009b) – Seismic Velocities and Geotechnical Data Applied to the Soil Microzoning of Western Algarve. *Jour. Appl. Geophysics*, 68: 249-258. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.01.001.
- Carvalho, J., Dias, R., Pinto, C., Leote, J. & Mendes-Victor, L. (2008) – A Soil Classification for Seismic Hazard Assessment and Mitigation of the Algarve. *14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, 12-17 Oct., Beijing, China, 7 p.
- Catchings, R. D., Goldman, M. R., Lee, W. H. K., Rymer, M. J. & Ponti, D. J. (1998) – Faulting apparently related to the 1994 Northridge, California, earthquake and possible coseismic origin of surface cracks in Potrero Canyon, Los Angeles County, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88: 1379-1391.
- Dias, R. P. (2001) – Neotectónica da Região do Algarve, Tese de Doutoramento, Univ. de Lisboa, 369 p.
- Dias, R.P. & Cabral, J. (2002) – Neotectonic activity of the Algarve region (S of Portugal), *Com.Inst. Geol. Min.*, 89: 193-208.
- Floyd, J. S., Mutter, J. C., Goodlife, A. M. & Taylor, B. (2001) – Evidence of fault weakness and fluid flow within an active low-angle normal fault. *Nature*, 411: 779-783, doi:10.1038/35081040.
- Ghose, R. & Goudswaard, J. C. M. (2004) – Integrating S-wave seismic reflection data and CPT using a multi-angle, multi-scale approach. *Geophysics*, 69: 440-459.
- Goforth, T. & Hayward, C. (1992) – Seismic reflection investigation of a bedrock surface buried under alluvium. *Geophysics*, 57: 1217-1227.
- Grandin, R., Borges, J. F., Bezzeghoud, M., Caldeira, B. & Carrilho, F. (2007) – Simulations of strong ground motion in SW Iberia for the 1969 February 28 ( $M_s = 8.0$ ) and the 1755 November 1 ( $M \sim 8.5$ ) earthquakes – I. Velocity model, *Geophysical Journal International*, 171(3): 1144-1161, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03570.x.
- Harris, J. B. (2000) – Hammer-impact SH-wave seismic reflection methods in neotectonic investigations: General observations and case histories from the Mississippi Embayment, U.S.A. *Journal of Earth Science*, 20: 513-525.
- Justo, J. L., & Salwa, C. (1998) – The 1531 Lisbon earthquake. *Bull. Seism. Soc. America*, 88: 319-328.
- Liner, C., L. & Liner, J., L. (1997) – Application of GPR to a site investigation involving shallow faults. *The Leading Edge* 16: 1649-1652.
- Moniz, C. M. F. B. (2010) – *Contributo para o conhecimento da falha de Pinhal Novo – Alcochete, no âmbito da Neotectónica do Vale Inferior do Vale do Tejo*. Dissertação de Mestrado em Geologia, Univ. Lisboa, 128 p.
- Oliveira, T. (Coord.) (1992) – Carta Geológica de Portugal, escala 1: 500 000. *Serv. Geol. Portugal*.
- Palmer, D. (1980) – The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. K. B. S. Burke (Ed.), *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, OK., 112 p.
- Penelis, G. G. (1997) – E urocode 8: Characterization of Seismic Action, Design Spectra, Future Trends. *Proceedings of SERINA – Seismic risk: An Integrated Seismological, Geotechnical and Structural Approach*, Thessaloniki, Greece, 479-492.
- Pereira de Sousa, F.L. (1919) – O terremoto de 1 de Novembro de 1755 em Portugal, um estudo demográfico, *Serv. Geol. Portugal*, 1: 277 p.
- Pinto, C. C., Carvalho, J., Costa, M., Rabeh, T., Terrinha, P., Duarte, H., Borges, J. Caldeira, B. & Cabral, J. (2010) – Seismogenic Sources in the Lower Tagus Area Using Geophysical Data. *72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC*, Barcelona, Spain, 14 - 17 June, 5 p.
- Pinto, C. (2011) – *Identificação de Estruturas com Potencial Sismogénico no Vale Inferior do Tejo*. Dissertação de Mestrado, Univ. de Évora, 126 p.
- Pugin, A. J. M., Larson, T. H. & Sargent, S. L. (2004) – Near-Surface Mapping Using SH-Wave and P-Wave Seismic Landstreamer Data Acquisition in Illinois, U.S. *The Leading Edge*, 23(7): 677-682.
- Pugin, A., Pullan, S. & Hubter, J. (2009) – Multicomponent high-resolution seismic reflection profiling. *The Leading Edge*, 28(10): 1248-1261.
- Quigley, M., Van Dissen, R., Litchfield, N., Villamor, P., Duffy, B., Barrell, D., Furlong, K., Stahl, T., Bilderback, E. & Noble, D. (2012) – Surface rupture during the

- 2010 Mw 7.1 Darfield (Canterbury, New Zealand) earthquake: implications for fault rupture dynamics and seismic-hazard analysis. *Geology*, 40 (1): 55-58.
- Ressurreição, R. (2009) – *Estudos de Neotectónica na falha de Carcavai (Algarve): contribuição para a caracterização desta estrutura e de paleossismos prováveis associados*. Dissertação de Mestrado, Univ. de Lisboa, 121 p.
- Ressurreição, R., Cabral, J., Dias, R. P., Carvalho J. & Pinto, C. (2011) – Neotectonic activity on the Carcavai fault zone (Algarve, Portugal). *Com. Geol.*, 98: 5-14.
- Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T., Matsubara, M. & Ikawa, T. (2002) – Deep seismic reflection profiling across the Ou Backbone range, northern Honshu Island, Japan. *Tectonophysics*, 355(1): 41-52, doi: 10.1016/S0040-1951(02)00133-6.
- Shtivelman, V., Frieslander, U., Zilberman, E. & Amit, R. (1998) – Mapping shallow faults at the Evrona playa site using high-resolution reflection method. *Geophysics*, 15: 1257-1264.
- Shtivelman, V., Marco, S., Reshef, M., Agnon, A. & Hamiel, Y. (2005) – Using trapped waves for mapping shallow fault zones. *Near Surface Geophysics*, 3: 95-101.
- Turesson, A. (2007) – A comparison of methods for the analysis of compressional, shear, and surface wave seismic data, and determination of the shear modulus. *Journal of Applied Geophysics*, 61(2): 83-91.
- Wang, Z., Madlin, I. P. & Woolery, E. W. (2004) – Shallow SH-wave seismic investigation of the Mt. Angel Fault, Northwest Oregon, USA. *Tectonophysics*, 368(1-4): 105-117, doi:10.1016/S0040-1951(03)00153-7.
- Williams, R. A., Stephenson, W. J., Odum, J. K. & Worley, D. M. (2001) – Seismic reflection imaging of Tertiary faulting and related post-Eocene deformation 20 km north of Memphis, Tennessee. *Engineering Geology*, 62(1-3): 79-90, doi:10.1016/S0013-7952(01)00052-7.
- Woolery, E. W., Street, R., Wang, Z. & Harris, J. B. (1993) – Nearsurface deformation in the New Madrid seismic zone as imaged by high-resolution SH-wave seismic methods. *Geophys. Res. Lett.*, 20: 1615-1618.
- Woolery, E. W., Wang, Z., Street, R. L., & Harris, J. B. (1996) – A P – and SH-Wave Seismic Reflection Investigation of the Kentucky Bend Scarp in the New Madrid Seismic Zone. *Seism. Res. Lett.*, 67: 67-74, doi:10.1785/gssrl.67.2.67.