

# A GEOFÍSICA E A APLICAÇÃO DA 4ª DIMENSÃO EM PROBLEMAS GEOTÉCNICOS - CASOS DE ESTUDO

## GEOPHYSICS AND 4<sup>TH</sup> DIMENSION APPLIED TO GEOTECHNICS – CASE STUDIES

Mota, Rogério, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*  
*rmota@lnec.pt*

### RESUMO

A monitorização de estruturas geotécnicas apresenta diversos desafios, alguns dos quais podem ser superados com base em técnicas geofísicas. Sendo estas de aplicação indireta, os resultados obtidos, nomeadamente a identificação de determinados alvos, tem por base a existência de contrastes nas propriedades físicas do subsolo ou do maciço rochoso subjacente, como, por exemplo, a sua resistividade elétrica ou a velocidade de propagação das ondas sísmicas. Por outro lado, não existindo fatores externos que as influenciem, estas propriedades são estáveis no espaço e no tempo. Deste modo, a repetição ao longo do tempo das medições destas propriedades físicas, com as mesmas configurações de medida e no mesmo local, teoricamente, dará uma imagem da evolução das condições físicas do subsolo ou do substrato rochoso nesse local, permitindo, assim, a sua monitorização ao longo do tempo. Apresentam-se, nesta comunicação, exemplos de aplicação deste princípio no campo da geotecnia, com base quer no método da resistividade elétrica quer no das tomografias sísmicas entre furos.

### ABSTRACT

Monitoring geotechnical structures presents several challenges, some of which can be overcome using geophysical techniques. Since these are indirect methods, the results obtained, namely the identification of certain targets, are based on the existence of contrasts in the physical properties of subsoil or rock mass, such as, for example, its electrical resistivity or seismic waves velocity. On the other hand, since there are no external factors that influence them, these properties are stable in space and time. In this way, time-lapse geophysical surveys with the same measurement settings and in the same location, theoretically, will reveal the local subsoil or rock mass physical conditions evolution, thus allowing the monitoring it over time. This communication presents two geotechnical application of this principle, based on the electrical resistivity method and in the crosshole seismic tomography.

### 1. INTRODUÇÃO

A monitorização ao longo do tempo de estruturas geotécnicas ou das fundações de estruturas edificadas de elevada importância para a sociedade baseia-se em leituras de instrumentos nelas instalados, como, por exemplo, marcas topográficas, piezómetros, furos inclinométricos, fios de prumo, que permitem identificar eventuais alterações que possam colocar em risco as estruturas construídas. Contudo, embora muito valiosa, esta informação é pontual ao longo do espaço e existem situações em que é importante ter um conhecimento mais abrangente no espaço. A geofísica, através de alguns dos métodos que utiliza para investigar as primeiras dezenas de

metros da crosta terrestre, a profundidade que interessa à Engenharia Civil, permite obter espacialmente a evolução ao longo do tempo das propriedades físicas medidas, sempre que ocorrem fatores externos que as influenciem. De entre elas destacam-se a resistividade elétrica do meio, i.e., a resistência do meio à transmissão de corrente elétrica, e a velocidade de propagação da onda sísmica de compressão, a onda P, sob a forma de tomografias sísmicas entre furos de sondagem. A primeira é mais adequada para aplicação em locais com alguma cobertura de solo, devido à necessidade de assegurar um bom contacto elétrico entre os elétrodos e o terreno, embora também seja aplicável em locais de rocha aflorante e ao longo de furos de sondagem. A segunda, dado o custo da execução dos furos de sondagem necessários para a sua aplicação, é adequada essencialmente em estudos de maciços rochosos de fundação de estruturas importantes como é o caso de barragens.

Apresentam-se, no presente trabalho, exemplos de perfis de resistividade elétrica executados num talude não rochoso e de tomografias sísmicas entre furos realizadas no maciço rochoso de fundação da barragem do Alto Ceira II.

## 2. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### 2.1. Estudo de um talude com base no método da resistividade elétrica

#### 2.1.1. Introdução

O método da resistividade elétrica é um método não invasivo de investigação do subsolo, que permite conhecer, a partir da superfície do terreno, as suas características geoeletricas. Este método consiste, basicamente, na injeção de corrente elétrica entre dois pontos (elétrodos A e B, na Figura 1 – dipolo de injeção), medindo-se, por meio de dois outros elétrodos (M e N – dipolo de potencial), a diferença de potencial elétrico gerado no terreno.

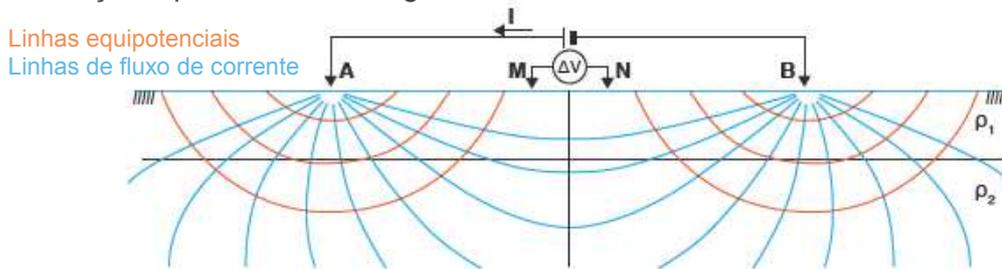


Figura 1 – Dispositivo tetraeletródico na superfície de um meio estratificado horizontalmente. ( $\rho_1$  e  $\rho_2$  - resistividade elétrica de cada uma das duas camadas) (Mota, 2017a)

A resistividade elétrica constitui uma medida da resistência que um material impõe à passagem da corrente elétrica. Esta é favorecida principalmente pela presença de água nos vazios do solo ou da rocha, e pelos sais nela dissolvidos, pelo que a resistividade depende não só da porosidade do material que compõe o terreno (matriz sólida), como também do seu teor em água e da sua concentração iónica, pelo que, quanto maior for o teor em água ou a presença de material condutor, como, por exemplo, grafite ou pirite, menor é a resistividade. Outro fator que influencia a transmissão da corrente elétrica é a presença de argila, não só pela sua composição química, como também em função do seu estado de saturação. Uma matriz sólida, pode, assim, ter um valor maior ou menor de resistividade elétrica, em função da presença de argila ou de um material condutor sólido e do seu teor em água, que pode

variar ao longo do tempo, conduzindo a uma variação da resistividade ao longo do tempo (Mota, 2017a).

A menor ou maior presença de água ao longo do tempo é um dos fatores que permite utilizar o método da resistividade como meio de monitorização de um determinado local, como o exemplo que se apresenta na secção seguinte. Também a alteração das características do subsolo, por ação humana, como, por exemplo, o seu tratamento por injeção de caldas de cimento é passível de ser monitorizado ao longo do tempo, permitindo, assim, avaliar a eficácia desse tratamento (Mota e Carvalho, 2019).

### 2.1.2. Resultados obtidos

Um talude de elevada pendente tem apresentado ao longo dos anos alguns problemas de estabilidade. O talude é bordejado, na sua base, por um muro de suporte, com cerca de 9 m de altura na sua extremidade sul e cerca de 2,5 m na sua extremidade norte. Este muro assenta diretamente num substrato Miocénico, sendo o talude constituído essencialmente por material de aterro e por depósitos de terraço e Miocénico (Figura 2).

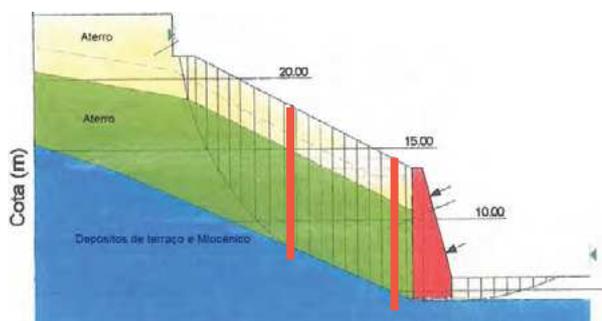


Figura 2 – Corte geológico interpretativo (os traços verticais de cor vermelha assinalam a posição e a dimensão vertical aproximada dos perfis geofísicos)

O talude encontra-se monitorizado com inclinómetros e foram executados esporões drenantes transversalmente ao muro de suporte, com 2,5 m de profundidade, para facilitar a infiltração das águas pluviais. O muro de suporte foi reforçado com ancoragens instrumentadas.

Com os objetivos de, por um lado, avaliar a viabilidade de se monitorizar esta estrutura por métodos espacialmente mais abrangentes do que aqueles existentes e, por outro, procurar investigar a eficácia do funcionamento dos esporões, procedeu-se à execução de dois perfis de resistividade elétrica implantados a cotas diferentes, paralelamente ao muro de suporte, ou seja, transversais aos esporões, centrados na escada de acesso a um dos inclinómetros e na zona onde o muro de suporte tem o seu maior desenvolvimento vertical (9 m). Estes perfis foram executados a 13 de abril de 2010 e repetidos a 24 de setembro do mesmo ano. Em abril terminou um período de forte pluviosidade, com valores de precipitação muito acima da média na região, reduzindo-se esta gradualmente a partir daí, até uma ausência quase total nos meses de julho a setembro (Quadro 1).

Os perfis foram executados com a configuração de medida de dipolo-dipolo, com 2 m de distância dipolar (afastamento entre elétrodos), perfazendo 80 m de extensão cada um. Apresentam-se na Figura 3 os resultados obtidos à cota superior, em ambos os períodos, e, na Figura 4, aqueles obtidos à cota inferior.

Quadro 1 – Precipitação mensal entre dezembro de 2009 e setembro de 2010 na região

Mês	Prec. (mm)
Dez 2009	295
Jan 2010	198
Fev	282
Mar	208
Abr	90
Mai	39
Jun	32
Jul	0
Ago	1
Set	1

Fonte: IPMA – Boletins climatológicos mensais

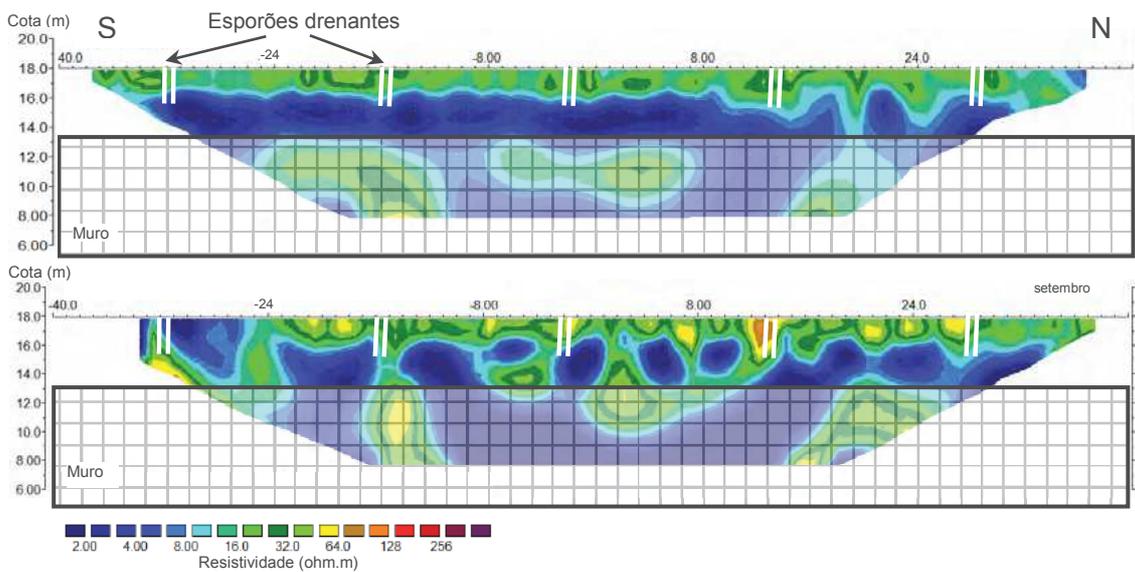


Figura 3 – Modelos de resistividade elétrica obtidos à cota superior, em abril (topo) e em setembro (baixo), com o eixo horizontal a representar o afastamento (m), para S e para N, de uma escada de acesso a um dos inclinómetros

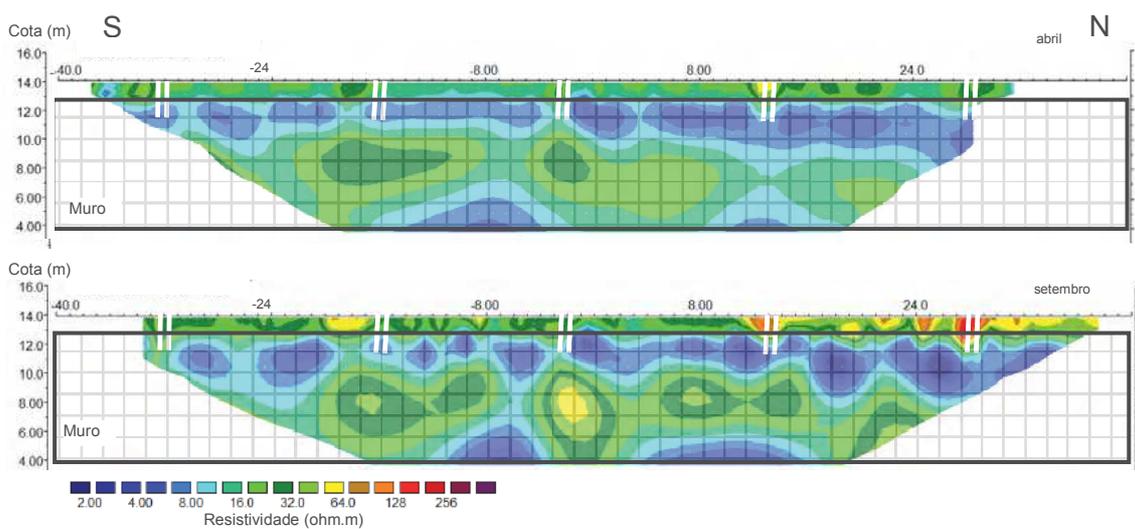


Figura 4 – Modelos de resistividade elétrica obtidos à cota inferior, em abril (topo) e em setembro (baixo), com o eixo horizontal a representar o afastamento (m), para S e para N, de uma escada de acesso a um dos inclinómetros

A análise dos resultados obtidos permite salientar, sucintamente, os seguintes aspetos:

- meio relativamente homogéneo, caracterizado por valores de resistividade elétrica baixos, o que evidencia a existência de uma matriz argilosa, com zonas de elevado grau de saturação;
- eficaz atuação dos esporões drenantes, evidenciada pelo menor conteúdo em água na camada de terreno atravessada por estes, que encaminham as águas pluviais recolhidas para zonas inferiores do terreno, caracterizadas por menor resistividade elétrica, devido, essencialmente, à presença de água;
- a camada superficial do terreno, mais seca, diminui de espessura das cotas mais altas para as mais baixas – passa de, aproximadamente, 1,5 m para 1,0 m;
- na primavera, o subsolo estava a saturar a cotas superiores, com percolação da água para cotas mais baixas na metade norte do perfil superior; esta água terá ficado parcialmente retida em profundidade, tendo em conta o baixo valor da resistividade elétrica evidenciado pelo perfil realizado no início do outono;
- o subsolo mais próximo do muro de contenção possui menos água e/ou material argiloso do que aquele mais afastado.

Os diferentes graus de saturação, traduzidos pela maior ou menor resistividade do solo, e a sua redução ou aumento ao longo do tempo permitem verificar a boa eficácia dos esporões drenantes e, igualmente, do sistema de drenagem existente no tardo do muro de suporte.

## 2.2. Análise da evolução de um maciço rochoso com base em tomografias sísmicas entre furos

### 2.2.1. Introdução

A tomografia sísmica entre furos de sondagem é uma técnica geofísica que envolve um elevado número de raios sísmicos que se entrecruzam, permitindo, assim, obter imagens de alta resolução da subsuperfície, em termos de velocidade sísmica da onda de compressão ( $V_P$ ). Deste modo, é uma técnica especialmente adequada para o zonamento das características mecânicas do maciço rochoso de fundação de grandes estruturas, como é o caso, por exemplo, de pontes (Butchibabu, et al., 2017, Mota, 2017b), barragens (Mota et al., 2015, Coelho et al., 2018, Mota et al., 2018) entre outros (Coelho et al., 2004, Oliveira e Coelho 2004, Lehmann 2007).

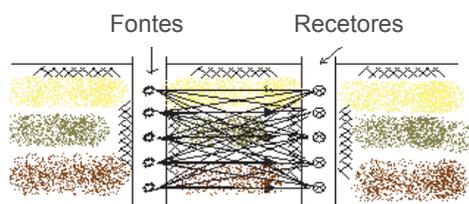


Figura 5 – Esquema simplificado do sistema de geração de ondas num furo e da sua receção no furo adjacente. As ondas sísmicas geradas são captadas em todos os recetores instalados no furo adjacente.

As velocidades das ondas sísmicas estão relacionadas com a qualidade e a resistência mecânica dos maciços rochosos e, portanto, podem ser utilizadas para avaliar a efetividade do tratamento das fundações, caso sejam realizadas tomografias sísmicas antes e após o tratamento. Geralmente, o tratamento de consolidação do

maciço rochoso consiste em injeções de calda de cimento para preencher as juntas que geralmente se apresentam abertas ou preenchidas com materiais macios e erodíveis (previamente removidos antes da injeção).

No caso de uma barragem, o uso de furos verticais, especificamente perfurados na sua fundação, permite obter um perfil de tomografia sísmica  $V_P$  do maciço rochoso de fundação da barragem ao longo da sua superfície de referência (superfície curva, que é planificada para o processamento dos dados). Os ensaios sísmicos e as tomografias correspondentes são realizados antes (Fase 1) e depois (Fase 2) do tratamento da fundação da barragem, e, eventualmente, após o primeiro enchimento da albufera (Fase 3). A Fase 1 constitui assim a situação de referência para aferição da qualidade do tratamento da fundação (Fase 2), a qual, por sua vez, será a situação de referência para o primeiro enchimento da albufera (Fase 3), e análise da eventual influência da massa de água sobre a fundação da barragem, assim como para todo o período de exploração da barragem, em que se considera que deverão ocorrer campanhas periódicas de aferição das condições da fundação.

Esta evolução com o tempo será aqui abordada apenas relativamente às Fases 1 e 2 da barragem do Alto Ceira.

### 2.2.2. Resultados obtidos

Apresentam-se na Figura 6 os resultados obtidos nas fundações da barragem do Alto Ceira II, na Fase 1 e na Fase 2 (Mota, 2013).

Considerando que as zonas do maciço de menor qualidade mecânica apresentam risco para a estrutura, nas tomografias sísmicas inverte-se a representação cromática da escala da velocidade; assim, como sinal de alerta, os valores mais baixos da velocidade representam-se a cor vermelha e os mais elevados a cor azul.

Na tomografia sísmica da Fase 1, executada apenas com um primeiro bloco de betão da barragem construído, na zona do furo FE5, é evidente a presença de zonas de baixa velocidade no maciço rochoso, em ambas as margens, coincidente, em geral, com zonas de falhas e de descontinuidades do maciço, identificadas no zoneamento geológico-geotécnico prévio.

Na Figura 7 apresenta-se a secção com a variação percentual da velocidade das ondas de compressão entre ambas as fases. Entre as fases 1 e 2 houve uma alteração no posicionamento do furo FE8, dando origem a uma diferente planificação da superfície de referência da barragem.

De um modo geral, nas zonas onde a velocidade da onda sísmica era inicialmente elevada, sinónimo de maciço mecanicamente competente, a variação entre a Fase 1 e a Fase 2 rondou os 10%. Nas zonas onde, na Fase 1, os valores da velocidade eram relativamente baixos, nomeadamente nas zonas intersetadas por falhas, verificou-se, após tratamento da fundação, um aumento da velocidade da onda sísmica, que atingiu, junto ao furo FE7, uma variação superior a 40%. A secção com a variação da velocidade da onda sísmica de compressão permite, quantitativa e objetivamente, destacar a melhoria das zonas inicialmente de pior qualidade mecânica, já identificável com a simples análise qualitativa do modelo tomográfico da Fase 2, possibilitando, assim, indiretamente avaliar quantitativamente a eficácia do tratamento do maciço rochoso da fundação da barragem.

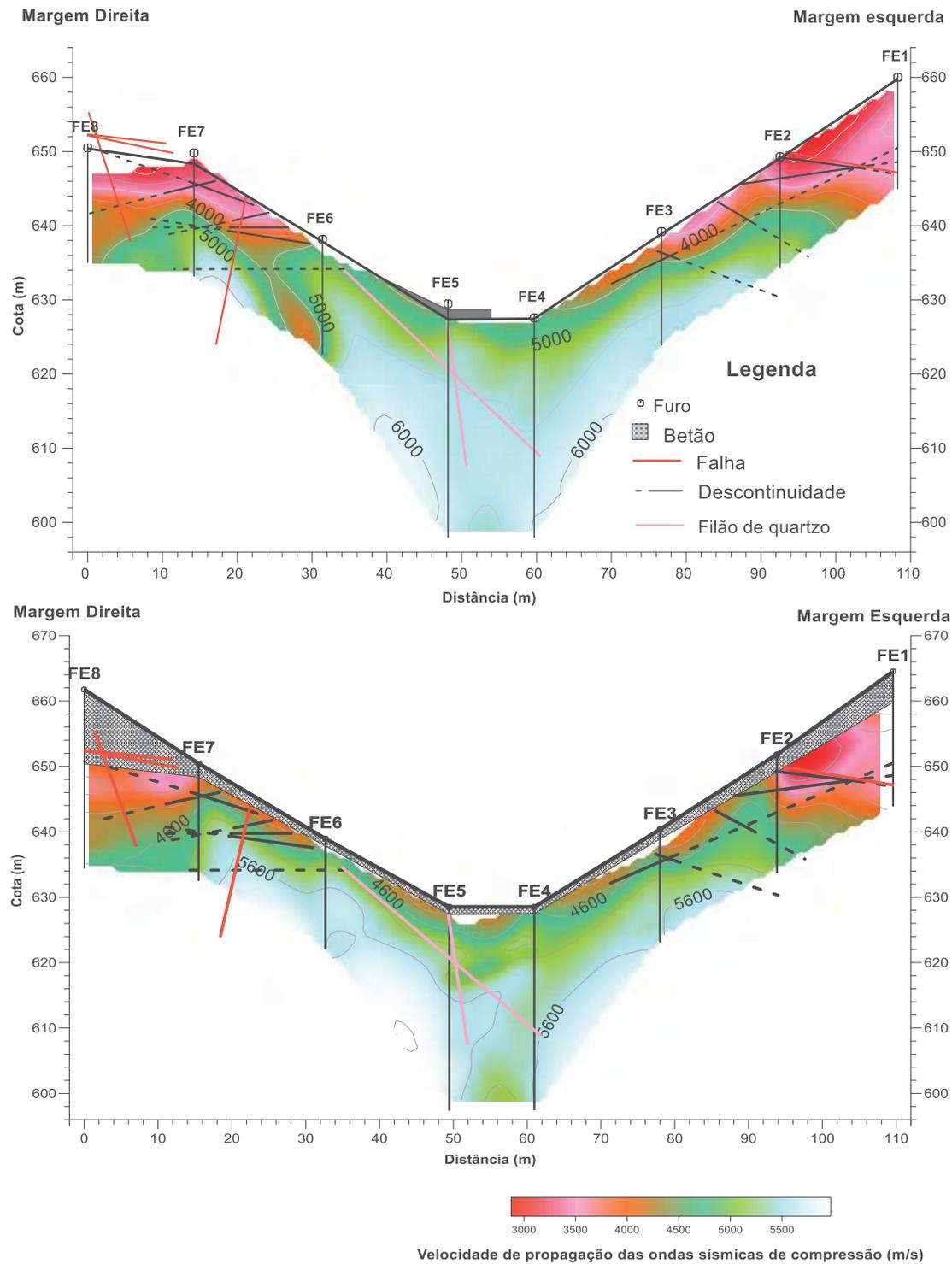


Figura 6 – Modelos de tomografia sísmica obtidos na barragem do Alto Ceira II. Topo - Fase 1 (referência). Baixo – Fase 2 (após tratamento de consolidação do maciço rochoso)

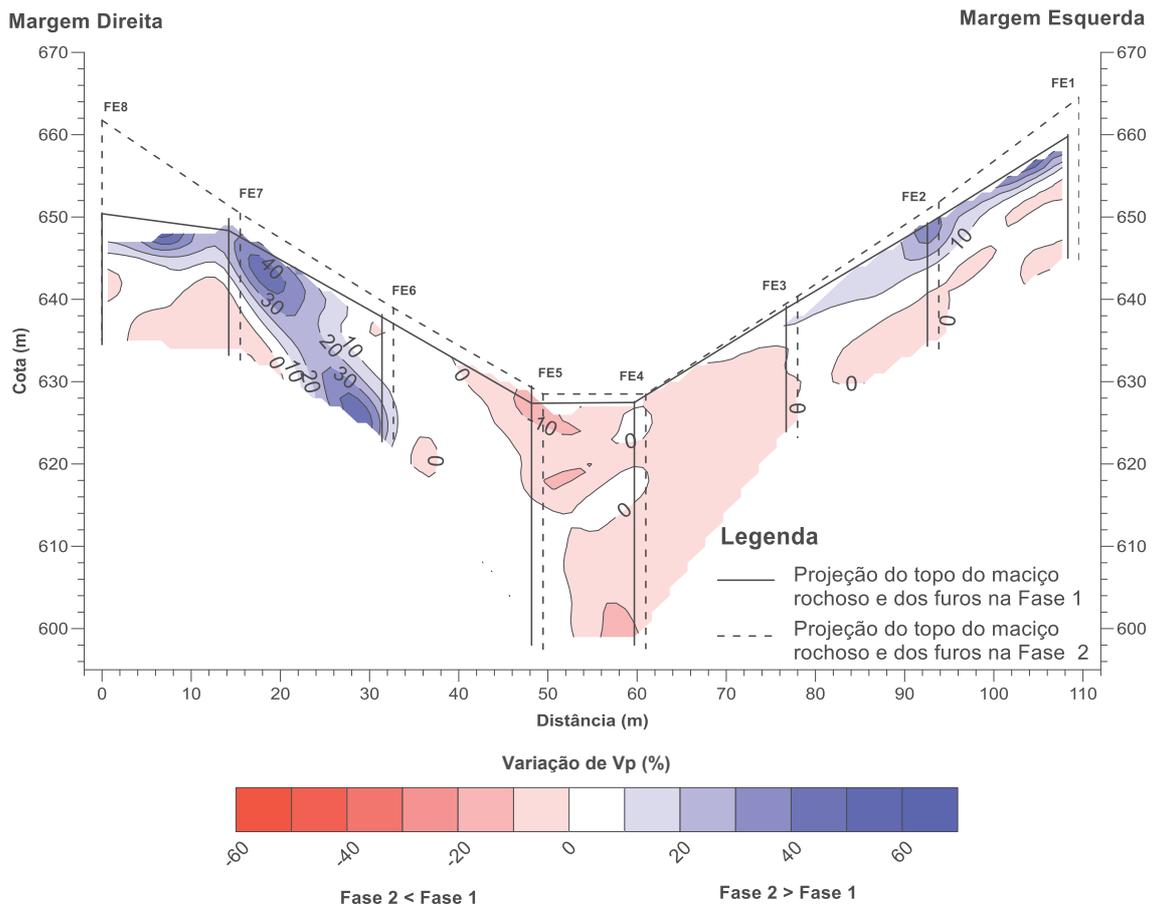


Figura 7 - Secção da variação percentual da velocidade de propagação da onda de compressão entre as fases 1 e 2.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho apresentaram-se aplicações de técnicas geofísicas na monitorização de estruturas geotécnicas. Os exemplos selecionados ilustram a aplicação do método da resistividade elétrica, com base na variação do teor em água ao longo do tempo, presente no solo constituinte de um talude, e do método da tomografia sísmica entre furos de sondagem, num maciço rochoso de fundação de uma barragem. No primeiro caso permitiu avaliar a eficácia do sistema de drenagem de águas implementado, e, no segundo, a eficácia do tratamento de consolidação do maciço rochoso nas zonas de menor qualidade mecânica.

A monitorização de estruturas geotécnicas, com base no método da resistividade elétrica, ao longo de um grande período de tempo, com medições periódicas da resistividade elétrica beneficiaria com a instalação de eléctrodos permanentes, os quais teriam a vantagem de reduzir o tempo de instalação e de desmontagem dos perfis, e por outro, de tirar proveito da estabilização da resistência elétrica de contacto entre o eléctrodo e o terreno. No caso das tomografias sísmicas esta situação de uma instalação permanente de parte do sistema de aquisição é inerente ao facto de se executarem furos de sondagem no maciço, sendo apenas necessário assegurar que os furos se encontram devidamente selados, para que não percam água, e protegidos com uma tampa inoxidável e de fácil utilização.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP - Gestão da Produção de Energia, SA, a autorização para publicação dos resultados obtidos na barragem do Alto Ceira II.

## REFERÊNCIAS

- Butchibabu, B., Sandeep, N., Sivaram, Y.V., Jha, P.C. e Khan, P.K. (2017). *Bridge pier foundation evaluation using cross-hole seismic tomographic imaging*, Journal of Applied Geophysics, 144, 104-114.
- Coelho, M. J., Mota, R., Morgado, A. e Neves, J. (2018). Time-lapse crosshole seismic tomography for characterisation and treatment evaluation of the Ribeiradio dam rock mass foundation. *Proceedings of NUMGE 2018 - 9th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Porto, pp. 7.
- Lehmann, B. (2007). *Seismic traveltime tomography for engineering and exploration applications*. EAGE, Houten, The Netherlands.
- Mota, R. (2013). Tomografias sísmicas nas fundações da nova barragem do Alto Ceira. Fase 2 (após-tratamento). Relatório LNEC 81/2013, Lisboa.
- Mota, R. (2017a). *Prospecção geofísica pelo método da resistividade elétrica*, Gazeta de Física, Vol. 40, Fascículo 3/4, pp 26-29.
- Mota, R. (2017b). Tomografias sísmicas às fundações dos pilares da ponte ferroviária sobre o rio Tua. Pilares 2, 3 e 4 – Fase 3 (após rebaixamento do leito rochoso do rio, por desmorte a fogo). Relatório LNEC 21/2017, Lisboa.
- Mota, R. e Carvalho, M. (2019). Prospecção geofísica, pelo método da resistividade elétrica, no desenvolvimento das obras de consolidação da encosta do Forte de S. Filipe, Setúbal. Relatório LNEC 423/2019, Lisboa.
- Mota, R., Coelho, M.J., Piteira Gomes, J., Batista, A. L., Neves, J., Lima, C. e Silva Matos, D. (2018). Rock mass foundation seismic tomography and its contribution for the modelling of Baixo Sabor dam's structural behaviour. *Proceedings of the Third International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, Brazil*.
- Mota, R., Neves, J. e Monteiro dos Santos, F. A. (2015). Geophysical methods applied to the assessment of the geological and geotechnical conditions of dam sites: the case study of Pedrógão dam (Portugal). *Proceedings of the Second International Dam World Conference*, Lisboa, Portugal, pp.12.
- Oliveira, M. e Coelho, M.J. (2004). Decomposed rock mass characterization with crosshole seismic tomography at the Heroísmo station site (Porto). *ISC'2, 2nd International Conference on Site Characterization, A. Viana da Fonseca and P.W. Mayne (eds.)*, Porto, Vol. 1, 531-538.