

BARRAGEM DO ALTO-TÂMEGA: AVALIAÇÃO DO MACIÇO DE FUNDAÇÃO COM BASE NA VARIAÇÃO TEMPORAL DA TOMOGRAFIA SÍSMICA ALTO-TÂMEGA DAM: ASSESSMENT OF THE ROCK MASS FOUNDATION BASED ON TIME-LAPSE SEISMIC TOMOGRAPHY

Mota, Rogério, *LNEC, Lisboa, Portugal, rmota@lnec.pt**

Coelho, Maria João, *LNEC, Lisboa, Portugal, marjoao@lnec.pt*

García Martín, Roberto, *Iberdrola, Madrid, Espanha, r.garcia@iberdrola.es*

Chacón Llorente, Rafael, *Iberdrola, Porto, Portugal, rchacon@iberdrola.pt*

**autor para correspondência*

RESUMO

A tomografia sísmica entre furos é uma técnica geofísica que permite obter a distribuição bidimensional da velocidade da onda sísmica de compressão ou onda P (V_P), com elevada resolução, na zona de estudo. Uma vez que V_P está diretamente relacionada com a qualidade e a resistência das rochas, refletindo as suas propriedades mecânicas, este método é particularmente adequado para a caracterização de zonas frágeis em fundações rochosas de barragens, quer em fase de construção, quer já em exploração. A tomografia sísmica pode, ainda, ser aplicada na avaliação do tratamento da fundação de barragens e do efeito do enchimento da albufeira (reservatório) no maciço de fundação, através da análise comparativa de tomografias sísmicas obtidas em diferentes fases: antes do tratamento da fundação, após o tratamento e após o enchimento do reservatório. Esta metodologia foi aplicada ao estudo da fundação rochosa da barragem do Alto-Tâmega nestas três fases, apresentando-se nesta comunicação os resultados obtidos, bem como a sua análise e interpretação.

ABSTRACT

Crosshole seismic tomography is a geophysical technique that allows for the high-resolution, 2D distribution of seismic compression or P-wave velocity (V_P) within a study area. Since this velocity is directly related to rock quality and strength, reflecting their mechanical properties, this method is particularly suitable for characterizing weak zones in dam rock foundations, whether during the construction phase or while already in operation. Seismic tomography can also be applied to assess the foundation treatment and the impact of reservoir filling on the foundation rock mass. This is achieved through a comparative analysis of seismic tomographies obtained at different stages: before foundation treatment, after treatment, and after reservoir filling. This methodology was applied to the study of the rock mass foundation of the Alto-Tâmega dam across these three phases. This paper presents the results obtained, as well as with their analysis and interpretation.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, em Portugal, o acompanhamento da construção de barragens de betão fundadas em maciços rochosos tem recorrido, por regra, a ensaios sísmicos entre furos para obtenção de tomografias sísmicas da fundação no perfil de referência das barragens. As tomografias sísmicas obtidas fornecem a distribuição bidimensional da

velocidade de propagação da onda sísmica de compressão ou onda P (V_P) no maciço rochoso da fundação das barragens.

Estes ensaios sísmicos e as consequentes tomografias são frequentemente repetidos em duas ou três fases: antes do tratamento de consolidação do maciço de fundação da barragem, habitualmente designada por Fase 1 (situação de referência), após o tratamento da fundação, Fase 2, e, por vezes, após o primeiro enchimento da albufeira, Fase 3 (Coelho et al., 2018, Mota et al., 2018, Mota e Coelho, 2018). Os objetivos destas três fases são distintos. Na Fase 1 o objetivo principal é a caracterização do maciço rochoso de fundação antes do seu tratamento de consolidação, de modo a servir de referência para o estudo da Fase 2. Na Fase 2 os objetivos são a nova caracterização do maciço após o tratamento de consolidação; a comparação desta caracterização com a obtida na Fase 1, de forma a avaliar a eficácia do tratamento do maciço, e, eventualmente, servir de referência para o estudo da Fase 3. Na Fase 3, o objetivo é, através da comparação entre as tomografias sísmicas obtidas nas Fases 2 e 3, avaliar se houve efeitos mecânicos, no maciço rochoso de fundação, causados pelo (primeiro) enchimento da albufeira (reservatório) da barragem.

No caso das barragens que constituem o Sistema Electroprodutor do Tâmega, construído por e concessionado à empresa Iberdrola S.A.U., o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC) realizou ensaios sísmicos entre furos para obtenção das tomografias da fundação nas três barragens do sistema: barragem de Gouvães, barragem de Daivões, e barragem do Alto-Tâmega. Na barragem principal, a do Alto-Tâmega, foram executados ensaios sísmicos e obtidas as consequentes tomografias nas três fases descritas, sendo os resultados obtidos o objeto desta comunicação.

2. IMPORTÂNCIA DOS MÉTODOS SÍSMICOS NO ESTUDO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A utilização de métodos sísmicos em várias fases temporais pode ter um papel importante na monitorização da evolução da qualidade mecânica dos maciços rochosos, especialmente em fundações de barragens (Savich et al., 1983; Barton, 2007; Dai et al., 2017). O parâmetro mais utilizado é a velocidade de propagação da onda sísmica P, V_P , que se correlaciona diretamente com o módulo de deformabilidade do maciço.

V_P depende do estado de alteração e de fraturação do maciço, da quantidade e da distribuição de água no maciço, e, ainda, do estado de tensão instalado. A variação de V_P pode, assim, permitir identificar alterações no estado físico do maciço com base em três fatores:

- Porosidade e fraturação: Relação inversa com V_P – quanto maior a fraturação e/ou a porosidade, menor é a velocidade da onda de compressão (V_P) (Altındağ e Guney, 2005; Mota, 2006);
- Saturação (teor em água): Relação direta com V_P – o aumento do teor em água num maciço geralmente resulta num aumento de V_P ;
- Estado de tensão: Relação direta com V_P – o aumento da tensão (pressão de confinamento) fecha as microfissuras, elevando a velocidade da onda (Pride *et al.* (2016); Savich et al., 1983); no entanto, o aumento do estado de tensão pode originar também alguma fendilhação e consequente aumento de percolação de água no maciço, o que pode levar a uma diminuição de V_P nestas regiões.

A utilização de métodos sísmicos, como é o caso da tomografia sísmica, no estudo dos maciços rochosos de fundação de barragens durante a sua construção e exploração pode assim ter várias aplicações:

- Avaliação da eficácia do tratamento do maciço rochoso da fundação da barragem; se o tratamento preencher os vazios (reduzindo a porosidade), V_P aumenta;
- Avaliação dos eventuais efeitos decorrentes do enchimento da albufeira, que incrementa o estado de tensão e o teor em água (saturação) no maciço, podendo levar ao aumento de V_P , embora o aumento da carga sobre o maciço possa igualmente causar alguma fendilhação e, conseqüentemente, diminuição de V_P ;
- Comparações periódicas com o estado de referência, o qual corresponderá à fase após o primeiro enchimento da albufeira, durante a exploração da barragem poderão detetar anomalias, tais como a lavagem de materiais de preenchimento das fissuras devido ao aumento da percolação.

Em síntese, as variações de V_P no maciço, ao longo do tempo, podem ser um indicador do aumento ou diminuição da sua qualidade mecânica decorrentes das intervenções (tratamentos) e/ou das alterações do estado de tensão e do teor em água no maciço.

3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DO ALTO-TÂMEGA

A barragem do Alto Tâmega localiza-se na zona Norte de Portugal, no concelho de Vila Pouca de Aguiar, integrando a região de Trás-os-Montes. A barragem encontra-se no curso médio do Rio Tâmega, que possui nascente na serra de San Mamede, província de Ourense (Espanha) e desagua no rio Douro, em Entre-os-Rios. A albufeira localiza-se nos concelhos de Vila Pouca de Aguiar, Chaves e Vidago.

Em termos geológicos, encontramos-nos no limite da Zona Centro Ibérica (ZCI) com a Zona da Galiza Média Trás-os-Montes (ZGMTM). A barragem localiza-se sobre o complexo metassedimentar da unidade de Vale de Égua, que é um maciço em contato, a sul, com a unidade das Fragas Negras por meio de um cavalgamento de baixa inclinação. Intersecta maioritariamente maciço de idade paleozoica de origem metassedimentar do domínio Estrutural de Carrazedo, correspondente ao silúrico superior, ocorrendo sobre este diversas manchas de depósitos aluvionares e/ou coluvionares mais recentes (Quaternário). Os materiais de origem metassedimentar, característicos da zona de implantação, são filitos cinzentos e xistos ampelitosos com intercalações de pequenas ocorrências de liditos, de quartzitos e de rochas calcossilicatadas. Estes metassedimentos silúricos, são frequentemente recortados por filões aplito-pegmatíticos de pequena extensão à escala regional.

No local, aflora a formação filítico-grauváquica, que, no terreno, aparece na forma de micaxistos, nos quais é possível observar um listrado milimétrico de micas e quartzos, com alguma granada dispersa, e nos quais são frequentes os veios de quartzo de exsudação. A literatura consultada descreve esta formação, do ponto de vista litoestratigráfico, como xistos, metagráuvaques e, em menor quantidade, metasamitas. No interior desta sequência, aparecem interestratificados mais finos de xistos escuros carbonosos e lidites (Figura 1).

É frequente surgirem vários tipos de rochas filonianas, que, geralmente, estão relacionados com os episódios mais tardios dos processos magmáticos que geraram os vários tipos de granitos presentes na área circundante. Estes filões têm como rocha

hospedeira os materiais metassedimentares do Paleozóico, surgindo geralmente devido a falhas e/ou zonas de fractura.

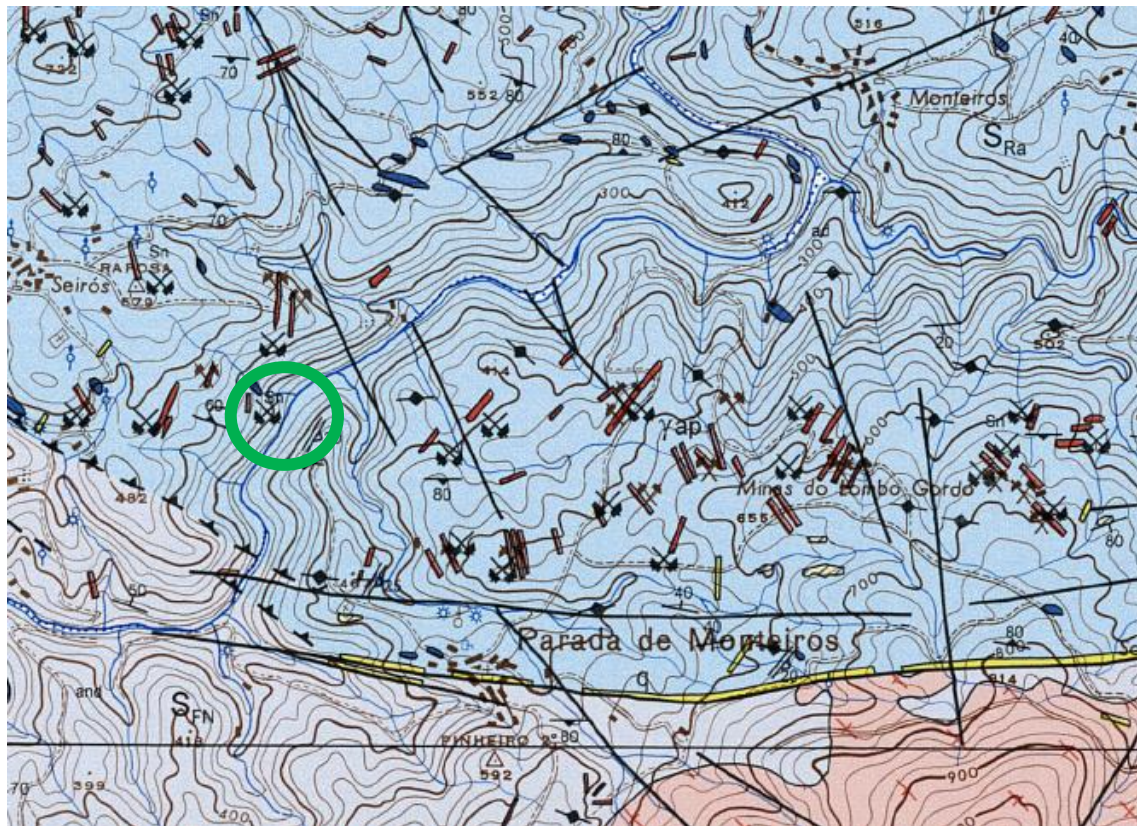


Figura 1 – Localização em planta da barragem do Alto Tâmega, extrato da carta geológica de Portugal, folha 6-D à escala 1/50 000

As estruturas filonianas ocorrentes na zona de implantação da barragem são essencialmente de natureza aplito-pegmatítica e quartzítica:

- **Filões Aplitopegmatíticos:** este tipo de filões é o mais frequente na área do estudo. São filões que dão colorações brancas com espessuras de 2-4 metros e 0,5-1 metro, sendo estes últimos os mais frequentes na área da barragem. A continuidade dos filões é muito irregular e apresenta encunhamentos frequentes. Em afloramento, estes filões aparecem bastante alterados, chegando a aparecer completamente arenizados. Nos afloramentos que parecem saudáveis, há um listrado paralelo na direção do filão, no qual os níveis mais pegmatíticos com cristais centimétricos alternam com os níveis mais aplíticos de tamanho de grão inferior. Os filões aplito-pegmatíticos apresentam-se segundo as orientações principais NNW-SSE, N-S, e E-W, encontrando-se frequentemente deformados. Estes filões caracterizam-se por coloração branca, com espessuras métricas, sendo os mais frequentes com espessura < 1 m, normalmente com desenvolvimento irregular e orientação subparalela à xistosidade.
- **Filões de quartzo:** trata-se de filões de quartzo leitoso que, no local da barragem, apenas aparecem associados a acidentes tectónicos. As espessuras chegam a alcançar os 3-4 metros, sendo as espessuras mais frequentes as inferiores a dois metros, ao passo que a continuidade pode alcançar valores importantes (várias centenas de metros e, até, quilómetros). Os filões de quartzo ocorrem segundo

orientações principais N-S e NE-S, pontualmente NW-SE e estando normalmente associados a fraturas regionais.

Em suma, em termos litológicos, a zona de fundação da barragem intersecta um maciço de natureza metassedimentar, pertencente à “Unidade do Vale da Égua, Sub-Unidade de Rancho”, que é uma formação filítico-grauváquica que aparece na forma de micaxistos, nos quais é possível observar um listrado milimétrico de micas e quartzo, e onde são frequentes os veios de quartzo de exsudação subparalelos à xistosidade e coincidentes com a descontinuidade principal do maciço. É de tonalidade cinzenta com faixas castanha-alaranjadas decorrente da precipitação persistente de óxidos nos planos de descontinuidade, bem como devido à alteração da matriz rochosa nas zonas próximas aos alinhamentos estruturais (falhas).

A Figura 2 ilustra o zonamento geotécnico resultante dos trabalhos de reconhecimento geológico-geotécnico no maciço de fundação da barragem (Granell, 2017).

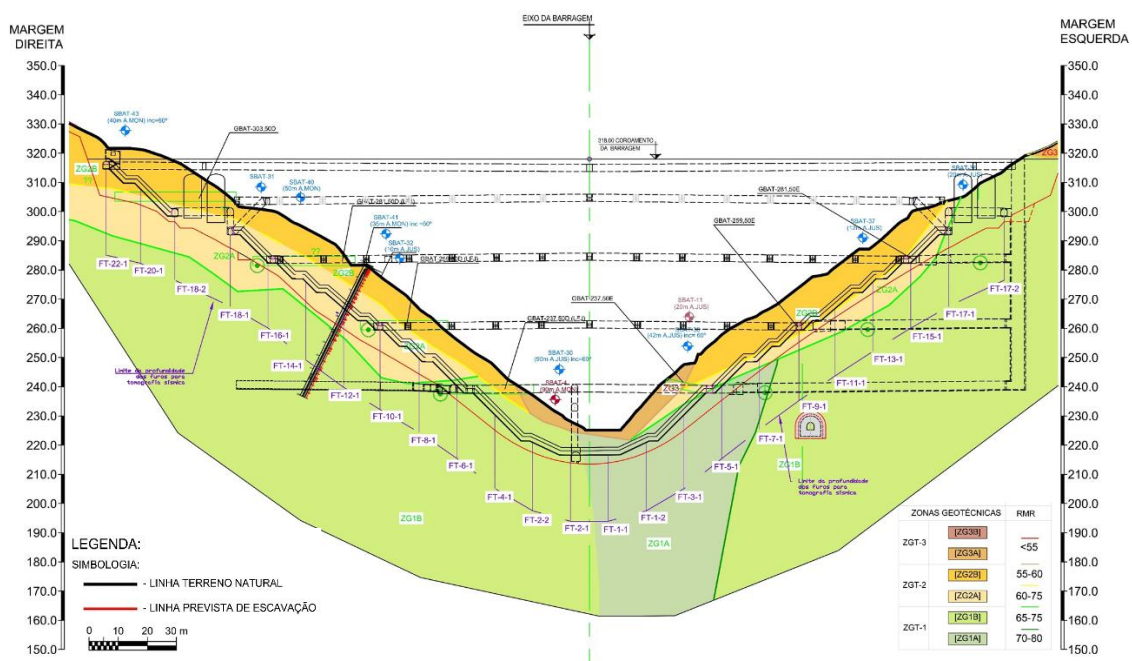


Figura 2 – Zonamento geotécnico da fundação pelo perfil perimetral da barragem, com representação dos furos de sondagem utilizados nos ensaios sísmicos (disponibilizado por Iberdrola, S.A.U.)

4. Tratamento da fundação da barragem

Com o objetivo de melhorar as características geotécnicas do maciço de fundação da barragem, e de acordo com os desenhos de projeto, procedeu-se à injeção de caldas de cimento na fundação. Esta injeção, após o processo de lavagem, foi preenchendo as descontinuidades existentes procurando assim promover a homogeneização da fundação, a redução da deformabilidade, bem como melhorar a estanquidade na zona de interface betão/rocha.

A primeira fase dos trabalhos consistiu na realização dos furos de consolidação pelo interior da barragem – galeria perimetral e no soco de jusante. Com o objetivo de

promover a remoção dos materiais de preenchimento das discontinuidades nas imediações dos furos, realizou-se posteriormente a lavagem dos furos através da injeção alternada de ar e água.

A injeção propriamente dita iniciou-se, genericamente, com o processo de fabrico da calda de cimento, misturando água e cimento, garantindo um tempo de mistura superior a 3 minutos, de forma a obter-se uma suspensão coloidal. Após a mistura, a calda foi transferida para um agitador onde permaneceu em agitação até ser conduzida ao injetor e enviada para o circuito de injeção. As caldas de cimento injetadas, cujos ensaios foram previamente executados pela Iberdrola, tinham diferentes composições em função das necessidades e indicações do projeto.

O controlo dos parâmetros de injeção foi efetuado com recurso a uma unidade de aquisição de dados automática que permite a medição e registo da pressão, caudal e volume injetado por troço e furo, produzindo um ficheiro de dados da injeção.

Os 10 m de injeção no maciço rochoso preconizados no projeto de execução foram realizados de forma ascendente, cujos troços foram definidos de acordo com o esquema de projeto (Figura 3. A malha de furos foi de 4mx4m no ponto de contato entre a rocha e a fundação da barragem.

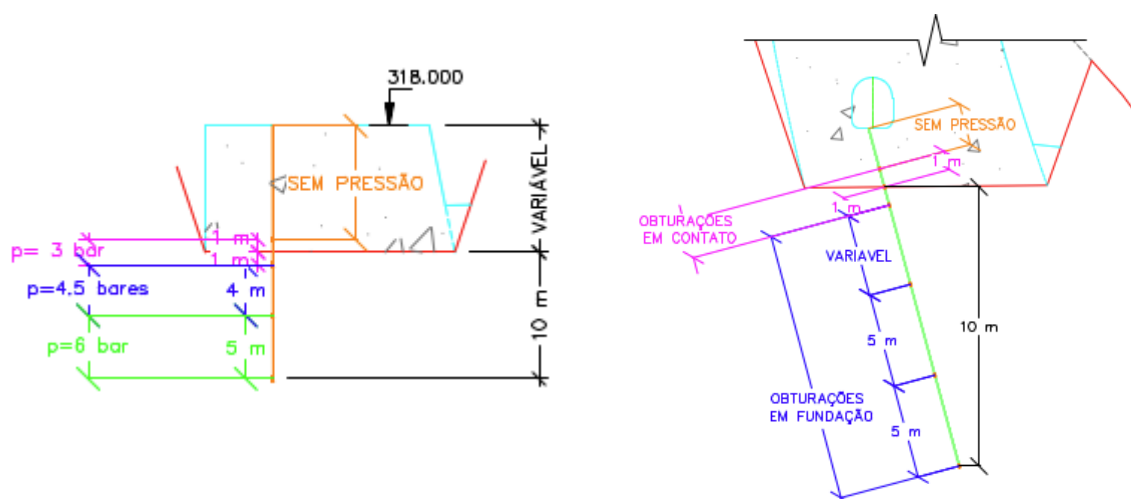


Figura 3 – Esquemas do processo de injeção

5. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS PARA A OBTENÇÃO DAS TOMOGRAFIAS SÍSMICAS (ENTRE FUROS)

Os ensaios sísmicos entre furos, do tipo leques sísmicos, baseiam-se na ativação de uma fonte de energia sísmica a profundidades sucessivas, desde a base até ao topo de um furo, enquanto as ondas sísmicas são recebidas e registadas por vários recetores instalados num furo adjacente, tal como é representado na Figura 4. Esta configuração tem como objetivo gerar uma elevada densidade espacial e cobertura angular de raios sísmicos na secção entre furos.

Na tomografia sísmica entre furos a distribuição de V_P é reconstruída a partir dos tempos de percurso das ondas P, assumindo que a propagação destas ondas ocorre segundo raios sísmicos retilíneos (ondas diretas entre a fonte e o recetor) e é puramente

bidimensional na secção entre furos (Coelho et al., 2018, LNEC, 2023, 2024, 2025). No processamento dos dados os tempos de percurso das ondas P, correspondentes aos raios sísmicos da(s) secção(ões) entre furos, são conjuntamente invertidos numa matriz de V_P atribuída a uma malha de células que discretiza a área da(s) secção(ões) entre furos. A inversão é realizada por um algoritmo desenvolvido no LNEC a partir do trabalho pioneiro de Pessoa (1990 e 1994), que assume, para além de raios sísmicos retilíneos, velocidade constante no interior de cada célula e materiais isotrópicos.

O processo iterativo parte de um modelo inicial da matriz de velocidades, a partir do qual são determinados os tempos de percurso das trajetórias retilíneas e as respetivas diferenças entre estes valores calculados e os tempos medidos, para cada raio sísmico. Estas diferenças entre tempos, designadas por tempos residuais, são utilizadas para melhorar o modelo de velocidades até que os tempos residuais sejam minimizados.

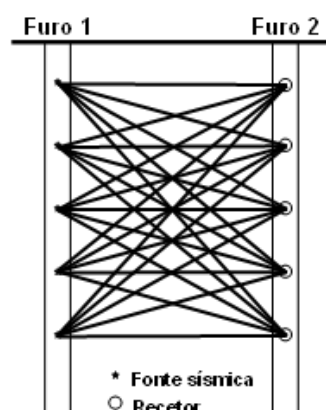


Figura 4 - Ensaio de leques sísmicos entre furos – a onda sísmica gerada em cada posição ao longo de um furo é registada por todos os recetores instalados no furo adjacente

Na fundação da barragem do Alto-Tâmega, os ensaios sísmicos foram realizados num total de 23 secções definidas pelos 24 furos verticais executados para o efeito ao longo da galeria perimetral da barragem (Figura 2), nas três fases já mencionadas. De um modo geral, foi utilizado um espaçamento de 1 m entre ativações consecutivas da fonte sísmica e entre recetores. Os furos utilizados tinham profundidades úteis entre cerca de 21 e 30,5 m.

6. RESULTADOS OBTIDOS

As tomografias sísmicas obtidas para o perfil perimetral (planificado) da barragem do Alto-Tâmega, em cada uma das Fases 1 a 3, são apresentadas na Figura 5. Na Figura 6 representam-se os perfis com as variações percentuais de V_P entre as Fases 2 e 1 e entre as Fases 3 e 2.

O erro residual médio (razão entre a média dos valores absolutos dos tempos residuais e a média dos tempos medidos) das tomografias apresentadas é de 3% na Fase 1 e de 2% nas Fases 2 e 3.

6.1. Fase 1

A tomografia sísmica obtida antes do tratamento de consolidação (Fase 1) revelou um maciço rochoso relativamente homogêneo, especialmente no fundo do vale (entre os furos F10 e F9) e na secção F17_1–F17_2 (margem esquerda). Nestas zonas V_P é superior a 4500 m/s, o que traduz uma elevada qualidade mecânica do maciço. Em contrapartida, na margem direita (entre F22 e F16), na secção F12–F10 e na região entre F9 e F17_1, os valores de V_P situam-se, em grande parte, abaixo de 4500 m/s, correspondendo a um maciço com menor qualidade mecânica. Contudo, velocidades inferiores a 4000 m/s restringem-se às zonas mais superficiais destas regiões.

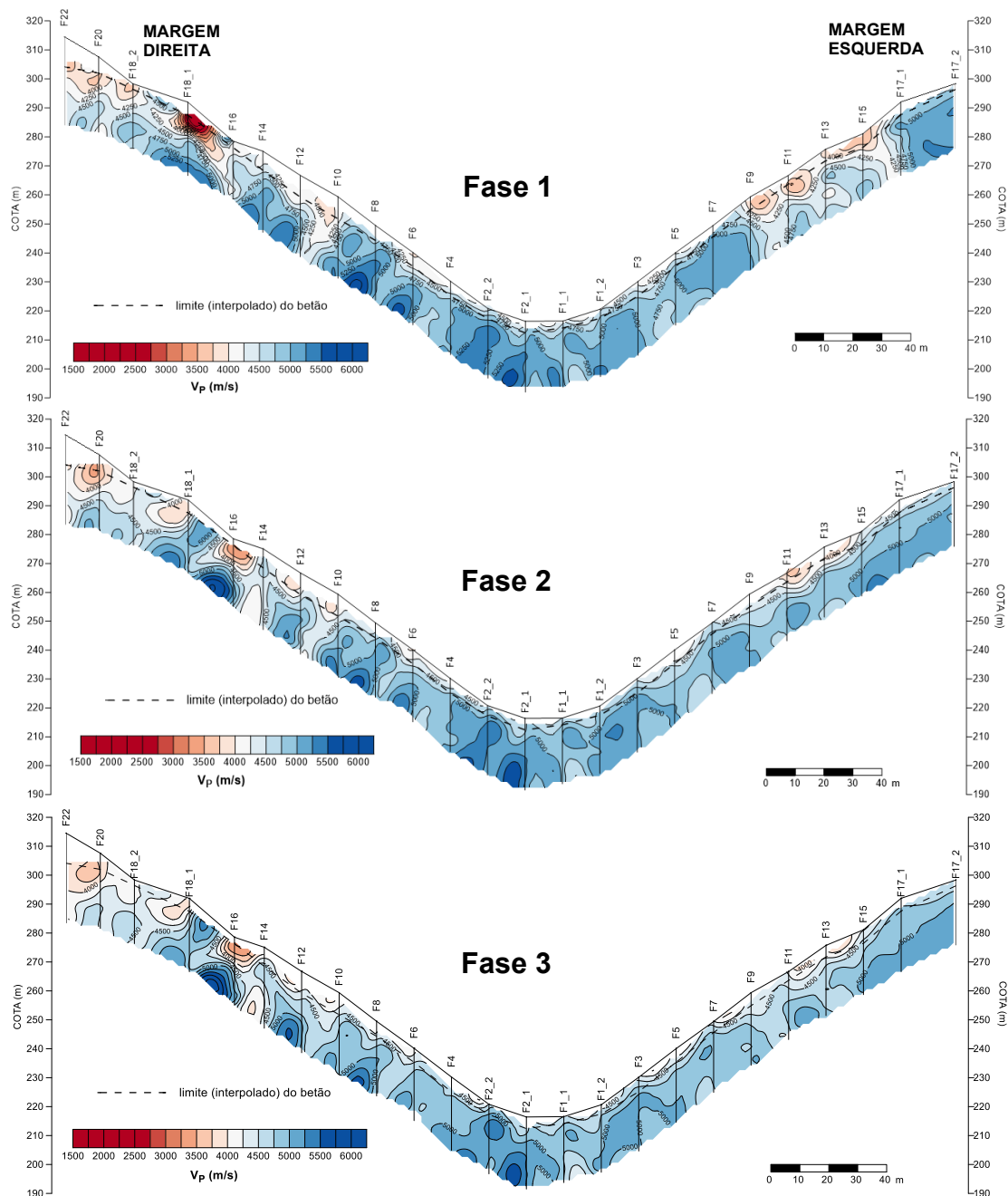


Figura 5 – Tomografias sísmicas da fundação da barragem do Alto-Tâmega segundo o perfil perimetral, obtidas nas Fases 1, 2 e 3 (LNEC, 2023; LNEC, 2024; LNEC 2025)

A anomalia de $V_P < 3500$ m/s observada na vizinhança do furo F18_1 deve ser analisada com prudência, uma vez que a menor cobertura de raios sísmicos nas periferias das secções entre furos compromete a estabilidade da inversão tomográfica, favorecendo o aparecimento de anomalias espúrias. Tais resultados são, frequentemente, artefactos do modelo derivados de condições de fronteira, sem correspondência direta com as propriedades físicas do maciço rochoso.

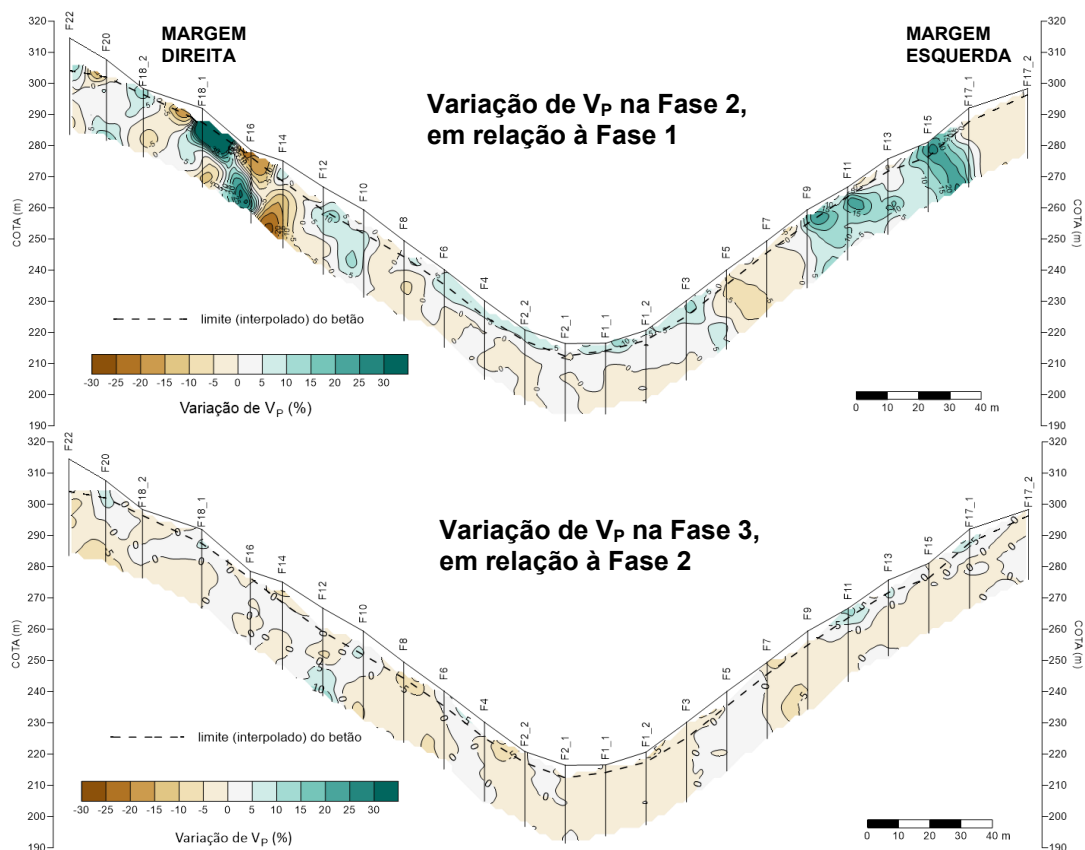


Figura 6 - Variações percentuais de V_P : em cima - Fase 2 relativamente à Fase 1 (LNEC, 2024); em baixo - Fase 3 relativamente à Fase 2 (LNEC, 2025)

De modo geral, a distribuição bidimensional de V_P da tomografia sísmica da Fase 1 apresenta uma concordância significativa com o zonamento geotécnico definido por Granell (2017), como é possível comprovar pela análise da Figura 7, destacando-se a sobreposição das regiões onde $V_P < 4500$ m/s, com a zona geotécnica ZG2A.

6.2. Fase 2

Na tomografia sísmica obtida após o tratamento de consolidação do maciço (Fase 2), verificaram-se aumentos de V_P superiores a 5% em regiões inicialmente (na Fase 1) menos competentes, tais como, entre os furos F9 e F17_1 e na secção F10–F12, o que traduz a eficácia do tratamento nestas regiões.

Na margem direita, entre os furos F22 e F14 obtiveram-se aumentos e diminuições de V_P difíceis de interpretar, eventualmente relacionados com dados incoerentes, comprometendo a avaliação da eficácia do tratamento nesta região.

Nas áreas que já apresentavam elevada qualidade mecânica (fundo do vale e secção F17_1–F17_2), as variações foram residuais ($\leq \pm 5\%$), situando-se dentro da margem de erro experimental. Este comportamento era expectável, dado que o maciço nestas regiões já teria certamente baixa permeabilidade.

Da comparação das tomografias das Fases 1 e 2 destaca-se ainda a distribuição mais homogênea de V_P na Fase 2, refletindo a regularização da qualidade mecânica do maciço após o tratamento.

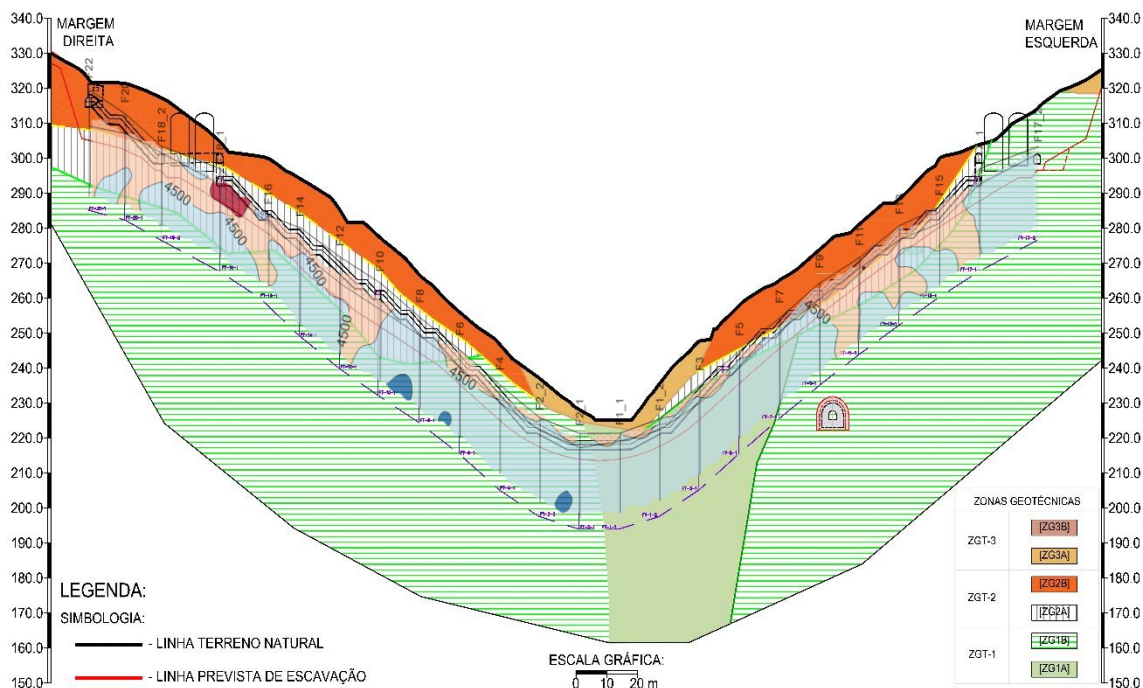


Figura 7 – Sobreposição da tomografia da Fase 1 (com intervalo de 1000 m/s entre isolinhas de velocidade) no zonamento geotécnico da fundação

6.3. Fase 3

Na tomografia sísmica obtida após o primeiro enchimento da albufeira (Fase 3) observou-se uma distribuição de V_P muito semelhante à obtida na Fase 2, com variações pouco significativas de V_P , na generalidade, dentro do intervalo de $\pm 5\%$, ou seja, da ordem de grandeza do erro experimental estimado. Esta estabilidade indica que o impacto do enchimento na qualidade mecânica do maciço de fundação foi residual.

7. Conclusão

As tomografias sísmicas do maciço rochoso de fundação da barragem do Alto-Tâmega, executadas em diferentes fases da construção e exploração da barragem, permitiram não só inferir a distribuição bidimensional da qualidade mecânica do maciço em cada uma das fases, como, por comparação entre as diferentes fases, avaliar a evolução dessa qualidade, decorrente quer do tratamento de consolidação do maciço, quer do enchimento da albufeira.

Em consequência, foi possível concluir sobre a eficácia do tratamento em diversas regiões do maciço que apresentavam menor qualidade mecânica na Fase 1 (antes do

tratamento), bem como sobre a ausência de impactos significativos causados pelo enchimento da albufeira.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Iberdrola, S.A.U. a autorização para a publicação dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- Altındağ, R.; Guney, A. (2005). Evaluation of the relationships between P-wave velocity (V_p) and joint density (JN). *Proc. 19th International Mining Congress and Fair of Turkey*, p. 101-106.
- Barton, N. (2007). *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor & Francis/Balkema.
- 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 NUMGE 2018 - 9th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Porto, pp. 7.
- Dai, Q.; Lin, F.; Wang, X.; Feng, D.; Bayless, R. C. (2017). *Detection of concrete dam leakage using an integrated geophysical technique based on flow-field fitting method*. *Journal of Applied Geophysics*, doi: 10.1016/j.jappgeo.2017.03.013.
- Granell Ingenieros Consultores (2017). A.H. Alto Tâmega. Projeto de execução. Barragem. Ref. 1862/11/121001, rev0.
- Iberdrola, S.A.U. BARRAGEM-Zonamento geotécnico com furos de Tomografia (862-0A-212003.dwg)
- LNEC (2023). *Tomografias sísmicas e parâmetros dinâmicos da fundação da barragem do Alto Tâmega (Sistema Eletroprodutor do Tâmega). Fase 1 (situação de referência)*. LNEC - Proc. 0504/1201/22176. Relatório 328/2023.
- LNEC (2024). *Tomografias sísmicas e parâmetros dinâmicos da fundação da barragem do Alto Tâmega (Sistema Eletroprodutor do Tâmega). Fase 2 (após o tratamento do maciço rochoso)*. LNEC - Proc. 0504/1201/22176. Relatório 275/2024.
- LNEC (2025). *Tomografias sísmica e parâmetros dinâmicos da fundação da barragem do Alto Tâmega (Sistema Eletroprodutor do Tâmega). Fase 3 (após o primeiro enchimento da albufeira)*. LNEC - Proc. 0504/1201/22176. Relatório 267/2025.
- PESSOA, J.M.N.C. (1990). *Aplicação de técnicas tomográficas à prospeção sísmica entre furos de sondagem*. Trabalho de síntese apresentado no âmbito das provas de aptidão pedagógica e capacidade científica na Universidade de Aveiro.
- PESSOA, J.M.N.C. (1994). *Aplicação de técnicas tomográficas à prospeção sísmica entre furos de sondagem*. LNEC - Proc. 054/11/10633. Relatório 27/94 – NP
- Pride, S.R.; Berryman, J.G.; Commer, M.; Nakagawa, S.; Newman, G.A.; Vasco, D.W. (2016). Changes in geophysical properties caused by fluid injection into porous rocks: analytical models. *Geophysical Prospecting*, doi:10.1111/1365-2478.12435.
- Mota, R. (2006). *Metodologias de prospeção geofísica aplicadas a problemas ambientais e geotécnicos – aplicação conjunta de métodos eléctricos e sísmicos*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa e Teses e Programas de Investigação (TPI) nº 57, LNEC, 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 behavior. *Proceedings Dam World 2018 – Third International Dam World Conference*, Brazil, pp. 10.

- Mota, R. e Coelho, M. J. (2018). Crosshole seismic tomography to assess rock mass foundation of dams - Alto Ceira II dam case study. *Proceedings 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Near Surface Geoscience Conference 2018*, Porto. DOI: 10.3997/2214-4609.201802528, pp. 5
- Savich, A.I.; Mikhailov, A.D.; Koptev, V.I.; Ilyin, M.M. (1983). Geophysical studies of rock masses. *Proceedings of 5th Int. Cong. Soc. Rock Mech. (ISRM)*, Melbourne, Australia, vol. 1, p. A19-A30.