

ESTIMATIVAS BIDIMENSIONAIS DE PARÂMETROS ELÁSTICOS DINÂMICOS EM MACIÇOS ROCHOSOS

TWO-DIMENSIONAL DISTRIBUTIONS OF DYNAMIC ELASTIC PARAMETERS ON ROCK MASSES

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

Coelho, Maria João, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, marjoao@lnec.pt*

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

Ramírez Ruiz, Miguel Ángel, *Iberdrola, Madrid, Espanha, mrru@iberdrola.es*

*autor para correspondência

RESUMO

No estudo para o zonamento, caracterização e avaliação global da qualidade mecânica e homogeneidade dos maciços rochosos de fundação de barragens é usual realizarem-se ensaios de leques sísmicos entre furos, para obtenção da tomografia da velocidade das ondas de compressão (V_P) da fundação rochosa. Recentemente, e para aplicação no estudo dos maciços rochosos de fundação das barragens de Daivões e do Alto-Tâmega, do Sistema Electroprodutor do Tâmega, desenvolveu-se uma metodologia para a obtenção de estimativas bidimensionais dos parâmetros elásticos dinâmicos com base nas secções tomográficas de V_P . Esta metodologia assenta no facto de existir, normalmente, uma relação linear entre V_P e V_S (velocidade das ondas de corte). Dada a dificuldade de se determinar a distribuição de V_S *in situ*, a referida relação linear obteve-se a partir das velocidades ultrassónicas V_{P-US} e V_{S-US} , medidas em laboratório, em provetes dos testemunhos recolhidos nos furos utilizados nos ensaios sísmicos. Posteriormente, utilizou-se esta relação para estimar a distribuição bidimensional de V_S no maciço rochoso a partir da distribuição de V_P resultante da tomografia sísmica, e consequentemente, dos parâmetros elásticos dinâmicos (módulo de Young, módulo de distorção, módulo de deformação volumétrica e coeficiente de Poisson). Apresentam-se os resultados obtidos para o maciço de fundação da barragem de Daivões.

ABSTRACT

For zoning, characterization and global assessment of the mechanical quality and homogeneity of dams' rock masses foundation, it is usual to carry out cross-hole seismic tests to obtain the rock foundation compression wave velocity (V_P) tomography. Recently, in the study of both Daivões and Alto-Tâmega dams' rock masses foundation (dams belonging to the Tâmega Electrical Power System), a methodology was developed to obtain two-dimensional estimates of the dynamic elastic parameters in rock masses based on the tomographic sections of V_P . This methodology is based on the fact that there is usually a linear relationship between V_P and V_S (shear wave velocity). Given the difficulty of determining the distribution of V_S *in situ*, this linear relationship was obtained from the ultrasonic velocities V_{P-US} and V_{S-US} , measured, in laboratory, on test specimens collected in the holes used for the seismic tests. Subsequently, this relationship was used to estimate the two-dimensional distribution of V_S in the rock mass from the distribution of V_P resulting from the seismic tomography, and consequently, the dynamic elastic parameters (Young's modulus, shear modulus, bulk modulus, and

Poisson's ratio). The results obtained for the Daivões dam rock mass foundation are presented.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do acompanhamento da construção de barragens de betão fundadas em maciços rochosos, em Portugal, tem sido regra a realização de ensaios sísmicos entre furos, para obtenção da tomografia da velocidade de propagação da onda sísmica de compressão (V_P) da fundação rochosa, com o objetivo de caracterizar o maciço rochoso de fundação e de avaliar a eficácia do seu tratamento com recurso a injeções de calda de cimento. Estes ensaios são, normalmente, realizados previamente ao tratamento da fundação (situação de referência), após o tratamento, e, por vezes, após o primeiro enchimento da albufeira (Coelho et al., 2018, Mota et al., 2018, Mota e Coelho, 2018).

No caso das barragens que constituem o Sistema Electroprodutor do Tâmega, concessionado à empresa Iberdrola, e a pedido desta empresa, o LNEC desenvolveu uma metodologia para a determinação de estimativas bidimensionais (2D) dos parâmetros elásticos dinâmicos no maciço rochoso de fundação das barragens de Daivões e do Alto Tâmega, com base na referida tomografia sísmica de V_P . São estes, o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young (E), o módulo de distorção (G), o módulo de deformação volumétrica (K) e o coeficiente de Poisson (ν). Estes parâmetros podem ser determinados com base nas velocidades das ondas sísmicas de compressão (V_P) e de corte (V_S), mas, dada a dificuldade de obtenção de dados de V_S *in situ*, foram realizados ensaios laboratoriais para medição das velocidades de propagação de ultrassons V_{P-US} e V_{S-US} , em provetes do maciço rochoso e, para, a partir destas, extrapolar uma relação V_P-V_S para o maciço rochoso de fundação de cada barragem. Procedeu-se, ainda, à determinação laboratorial da massa volúmica dos provetes do maciço rochoso, cujo valor médio foi utilizado no cálculo dos parâmetros dinâmicos

Apresentam-se os resultados obtidos na barragem de Daivões, após o primeiro enchimento da albufeira.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Enquadramento geológico

A barragem de Daivões localiza-se na zona Norte de Portugal, mais concretamente nos concelhos de Ribeira de Pena e Cabeceiras de Basto, 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, na localidade de Entre-os-Rios.

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 granítico de Cabeceiras de Basto, que é um maciço compósito, com uma forma alongada de orientação NW-SE. Estes granitos prolongam-se desde a serra da Cabreira, passando por Ribeira de Pena e prolongando-se para SE.

A barragem de Daivões intersecta maioritariamente maciço de idade paleozoica de origem plutónica, ocorrendo sobre estas diversas manchas de depósitos aluvionares e/ou

coluvionares mais recentes (Quaternário). Os materiais de origem plutónica, característicos da zona de implantação, são granitos de duas micas, com textura hipidiomórfica granular, classificados petrograficamente como monzogranitos e granodioritos de grão médio a fino.

Estes granitos de duas micas foram agrupados em três unidades, em função da sua granulometria, dado que em termos gerais as suas diferenças são reduzidas, e, por vezes, difíceis de identificar.

Em Daivões afloram os granitos de grão médio e de grão médio a grosseiro (Granito da Serra da Cabreira e de Ribeira de Pena). (Figura 1). Este granito caracteriza-se por exibir uma granularidade relativamente homogénea, embora apresente pontualmente cristais mais desenvolvidos de feldspato potássico e de plagioclase.

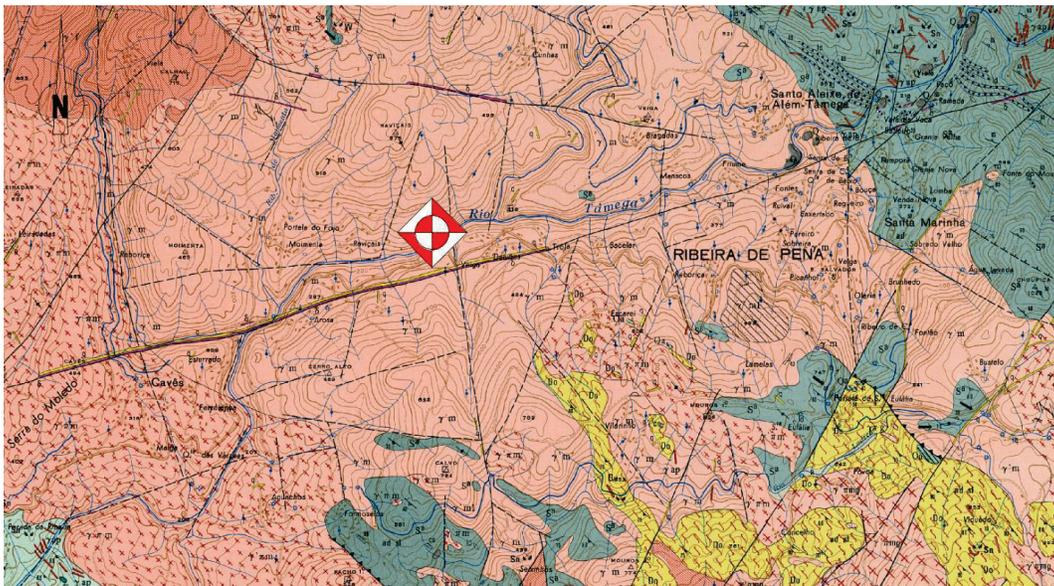


Figura 1 - Localização em planta da barragem de Daivões, extrato da carta geológica de Portugal, à escala 1/50 000

As estruturas filonianas ocorrentes na zona de implantação da barragem são essencialmente de natureza aplito-pegmatítica, quartzo e filões básicos, normalmente associados a fenómenos tardios dos processos magmáticos.

Os filões de aplito e/ou pegmatito ocorrem em orientações de instalação segundo NNW-SSE, NE-SW e E-W, estando relacionados espacial e geneticamente com os granitos sintectónicos de duas micas e encontram-se por norma deformados.

Os filões de quartzo ocorrem na zona de estudo normalmente segundo as orientações das fraturas regionais, com orientações N-S, NE-SW e, mais raramente, NW-SE, com possanças que podem atingir as dezenas de metros, sendo que no local de implantação da barragem não se verificam tais possanças.

Os filões básicos apresentam direções de instalação segundo as orientações E-W e ENE-WSW, sendo frequente encontrarem-se alterados e associados a filões de quartzo preenchendo zonas de fracturação regional.

Em suma, em termos litológicos a zona de fundação da barragem intersecta um maciço de natureza plutónica, composto por granito de duas micas de grão médio a fino de tonalidade geral branca-acinzentada, ocorrendo pontualmente zonas de tonalidade castanha-alaranjada 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).

2.2. Metodologia de aquisição dos dados para tomografia sísmica

A técnica dos ensaios sísmicos entre furos, do tipo leques sísmicos, consiste na ativação de uma fonte de energia sísmica a profundidades sucessivas, da base para o topo de um furo, e em receber e registar as ondas sísmicas, em diversos recetores colocados ao longo de um furo adjacente, com iguais espaçamentos entre sucessivas posições da fonte e dos recetores (Figura 2). Esta multiplicidade de posições tem por objetivo produzir uma elevada densidade espacial de raios sísmicos na secção/secções em estudo.

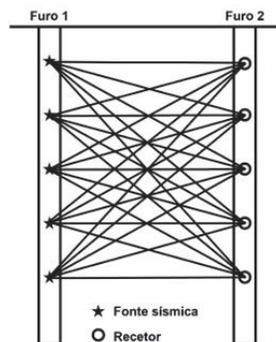


Figura 2 - Ensaio de leques sísmicos entre furos - a onda sísmica gerada em cada posição no interior de um furo é rececionada em todos os recetores instalados no interior do furo adjacente

A cada ativação da fonte sísmica corresponde um sismograma referente a um leque sísmico (diferentes trajetórias das ondas sísmicas entre a fonte e os recetores). O número de leques sísmicos depende da geometria utilizada (distâncias entre as sucessivas posições da fonte e dos recetores, e, ainda, da profundidade dos furos).

2.3. Parâmetros elásticos do meio

Considerando que a energia envolvida, quer nos ensaios sísmicos entre furos (*in situ*), quer nos ensaios laboratoriais de ultrassons em provetes de rocha, não provoca deformações permanentes do meio, é válido considerar-se que a propagação, quer das ondas sísmicas no maciço rochoso, quer das ondas ultrassónicas nos provetes, obedece à teoria da propagação de ondas num meio elástico. Nestas condições, é aplicável a lei de Hooke, que relaciona as deformações com as tensões que lhes dão origem e que permite definir os parâmetros elásticos do meio, tais como, o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young (E), o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de deformação volumétrica (K) e o módulo de distorção (G) (Sheriff, 1991). No âmbito da geotecnia e da engenharia civil, estes parâmetros são frequentemente designados por módulos elásticos dinâmicos, ou apenas por módulos dinâmicos, em oposição aos correspondentes módulos estáticos, obtidos a partir de ensaios que envolvem, normalmente, maiores deformações, como, por exemplo, o ensaio de compressão uniaxial em provetes de rocha.

Da teoria de propagação das ondas em meios elásticos, a equação de onda possui duas soluções, correspondentes à onda P e à onda de corte ou onda S, com velocidades de propagação V_P e V_S , respetivamente, expressas em função dos parâmetros elásticos e da massa volúmica do meio (ρ). De modo equivalente, os parâmetros elásticos podem ser definidos em função de V_P , de V_S e de ρ :

$$E = \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{(V_P^2 - V_S^2)} \quad [1]$$

$$G = \rho V_S^2 \quad [2]$$

$$K = \rho \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) \quad [3]$$

$$\nu = \frac{(V_P^2 - 2V_S^2)}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad [4]$$

Sendo o objetivo a obtenção de estimativas 2D dos parâmetros dinâmicos para o maciço rochoso interessado pela tomografia sísmica de V_P ($V_{P-in situ}$), e dado que não existe a correspondente tomografia de V_S ($V_{S-in situ}$), mas usualmente existe uma relação de linearidade entre V_P e V_S (e.g., Castagna et al., 1985), recorreu-se a ensaios laboratoriais de ultrassons para se obter uma relação entre V_{P-US} e V_{S-US} que permitisse, por extrapolação para a situação *in situ*, atingir o objetivo pretendido. Estes ensaios foram realizados sobre provetes provenientes, na sua maioria, da amostragem de sondagens executadas para os ensaios sísmicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efetuiu-se uma seleção dos trechos dos testemunhos de cada sondagem, visando a identificação de amostras representativas das litologias interessadas em cada sondagem e com dimensões adequadas para a obtenção dos provetes para os ensaios laboratoriais. Das amostras selecionadas foram obtidos 82 provetes cilíndricos com diâmetros situados entre 41 mm e 71 mm (Quadro 1).

Retiraram-se, ainda, das amostras selecionadas, uma média de quatro provetes adjacentes a cada um daqueles produzidos para os ultrassons, de que resultou um conjunto de 321 provetes para determinação da massa volúmica.

Quadro 1 – Repartição das 82 amostras por classes de alteração (W) e de fraturação (F) dos testemunhos das sondagens

Grau	W	F
1	57	58
1-2	4	5
2	8	9
2-3	7	3
3	5	3
3-4	-	2
4	1	1
4-5	-	1

Os ensaios de ultrassons, para determinação de V_{P-US} e de V_{S-US} , seguiram procedimentos baseados na norma NP EN 14579 (2007), sob três condições

sucessivas e diferentes: 1) provetes à temperatura e humidade ambiente (designados, daqui em diante, por provetes “ambientes”); 2) provetes secos em estufa, a 105°C, e 3) provetes com grau de saturação resultante da sua submersão em água durante uma semana (designados, daqui em diante, por provetes “saturados”). Constam na Figura 3 os gráficos com os resultados obtidos, que evidenciam a relação marcadamente linear entre V_{P-US} e V_{S-US} , apresentando-se, para cada conjunto de dados, as respetivas retas de regressão linear e os correspondentes coeficientes de determinação, R^2 . Estas regressões lineares são descritas pelas seguintes equações (em m/s):

$$V_{S-US} = 0,577 V_{P-US} + 25,59 \quad [5]$$

$$V_{S-US} = 0,602 V_{P-US} - 41,94 \quad [6]$$

$$V_{S-US} = 0,487 V_{P-US} + 371,21 \quad [7]$$

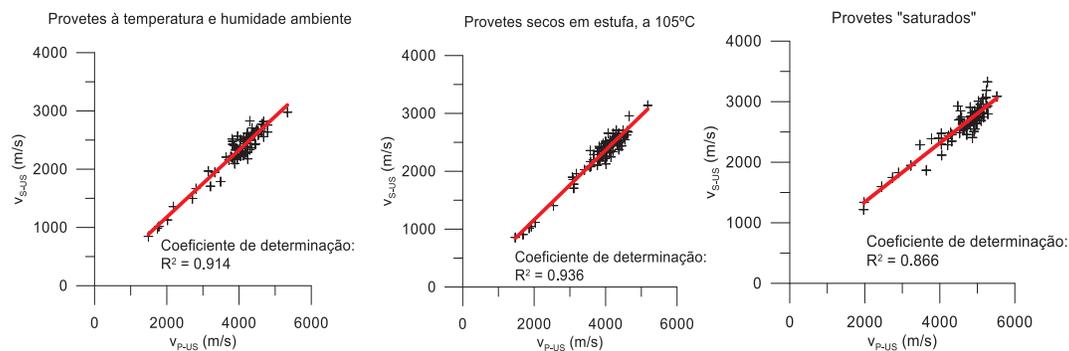


Figura 3 - Regressões lineares entre V_{S-US} e V_{P-US} para as três condições dos ensaios de ultrassons

Destaca-se, da observação destes gráficos, o aumento nos valores de V_{P-US} e de V_{S-US} nos provetes “saturados” face aos restantes. Efetivamente, os provetes secos em estufa e os “ambientes” apresentam valores médios semelhantes de V_{P-US} e de V_{S-US} , cerca de 3900 m/s e de 2300 m/s, respetivamente, enquanto os valores médios para os provetes “saturados” aumentaram para cerca de 4600 e 2600 m/s.

À data da execução dos ensaios de leques sísmicos entre furos, o maciço rochoso estaria, em grande parte, saturado, pelo que se considerou que as condições de ensaio de ultrassons que mais se assemelham às existentes no maciço rochoso são aquelas obtidas com os provetes “saturados”. Assim, a relação mais adequada para extrapolar a distribuição 2D de $V_{S-in situ}$ a partir da distribuição 2D de $V_{P-in situ}$, obtida pela tomografia sísmica, será a equação [7]. Apresentam-se ambas as distribuições na Figura 4.

As massas volúmicas dos provetes foram determinadas laboratorialmente através de procedimentos baseados na norma NP EN 1936 (2008), ou seja, pelo método das pesagens hidrostáticas, com os provetes saturados sob vácuo. Foram determinadas a massa volúmica real, a massa volúmica aparente e a massa volúmica aparente saturada. Os resultados obtidos têm pequena variação entre si, quer ao longo da galeria da barragem, quer em profundidade. Assim, considerou-se no cálculo dos parâmetros elásticos dinâmicos com base nas equações [1] a [4], para todo o maciço rochoso, um valor constante de ρ , correspondente ao valor médio da massa volúmica aparente saturada (2596,7 kg/m³). As estimativas 2D dos parâmetros dinâmicos E , K , G e ν , assim calculadas a partir da distribuição 2D de $V_{P-in situ}$ e da sua extrapolação da distribuição 2D de $V_{S-in situ}$, são representadas na Figura 5.

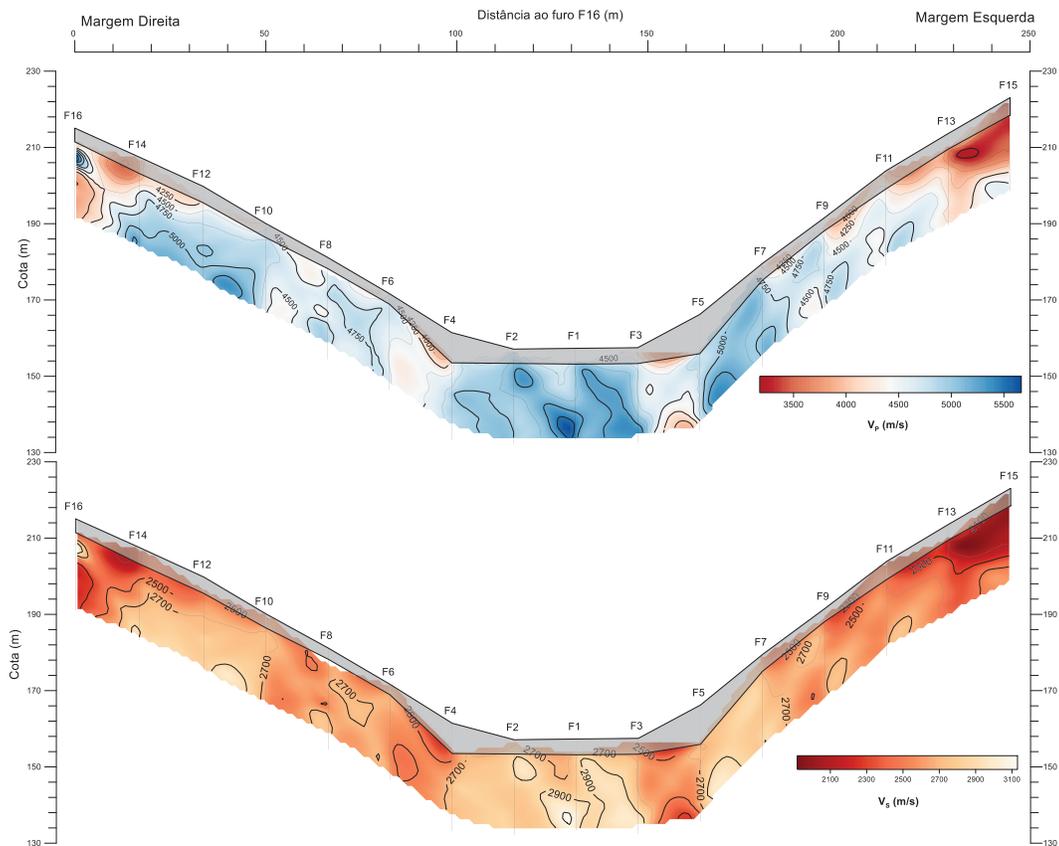


Figura 4 - Perfil da galeria perimetral da barragem de Daivões: topo – distribuição de $V_{P-in\ situ}$ (tomografia sísmica); base – distribuição de $V_{S-in\ situ}$ (extrapolada de $V_{P-in\ situ}$ com base na expressão [7]) (LNEC, 2022a)

Foram igualmente calculados os parâmetros E , G , K e ν com base nos resultados laboratoriais de V_{P-US} e de V_{S-US} . No Quadro 2 apresenta-se uma análise estatística comparativa entre estes resultados e aqueles *in-situ*. Verifica-se que os valores laboratoriais dos módulos E , G e K são ligeiramente superiores aos obtidos a partir de $V_{P-in\ situ}$ e de $V_{S-in\ situ}$, pelo menos em termos de valores médios e máximos, tal como era esperado, uma vez que os provetes foram seleccionados das partes mais sãs do material rochoso obtido nas sondagens, enquanto o maciço é mais heterogéneo.

Quadro 2 - Análise estatística dos resultados laboratoriais de ultrassons (US) e de massa volúmica, em provetes “saturados”, e dos correspondentes resultados obtidos *in situ* (adaptado de LNEC, 2022a)

	V_P (m/s)		V_S (m/s)		ρ^{**} (kg/m ³)	E (GPa)		G (GPa)		K (GPa)		ν	
	US	<i>In-situ</i>	US	<i>In-situ</i> *		US	<i>In-situ</i>	US	<i>In-situ</i>	US	<i>In-situ</i>	US	<i>In-situ</i>
Mínimo	1970	3159	1220	1919	2442	9	23	4	9	4	13	0,08	0,21
Média	4610	4624	2615	2637	2596,7	46	45	18	18	32	32	0,25	0,26
Máximo	5520	5460	3330	3046	2793	69	61	29	24	45	46	0,34	0,28
Mediana	4855	4724	2690	2686	2593,5	48	47	19	19	35	33	0,26	0,26
Desvio padrão	710	437	371	214	57,9	12	7	5	3	10	6	0,05	0,01

* extrapolada com recurso à equação [7];

** massa volúmica aparente saturada

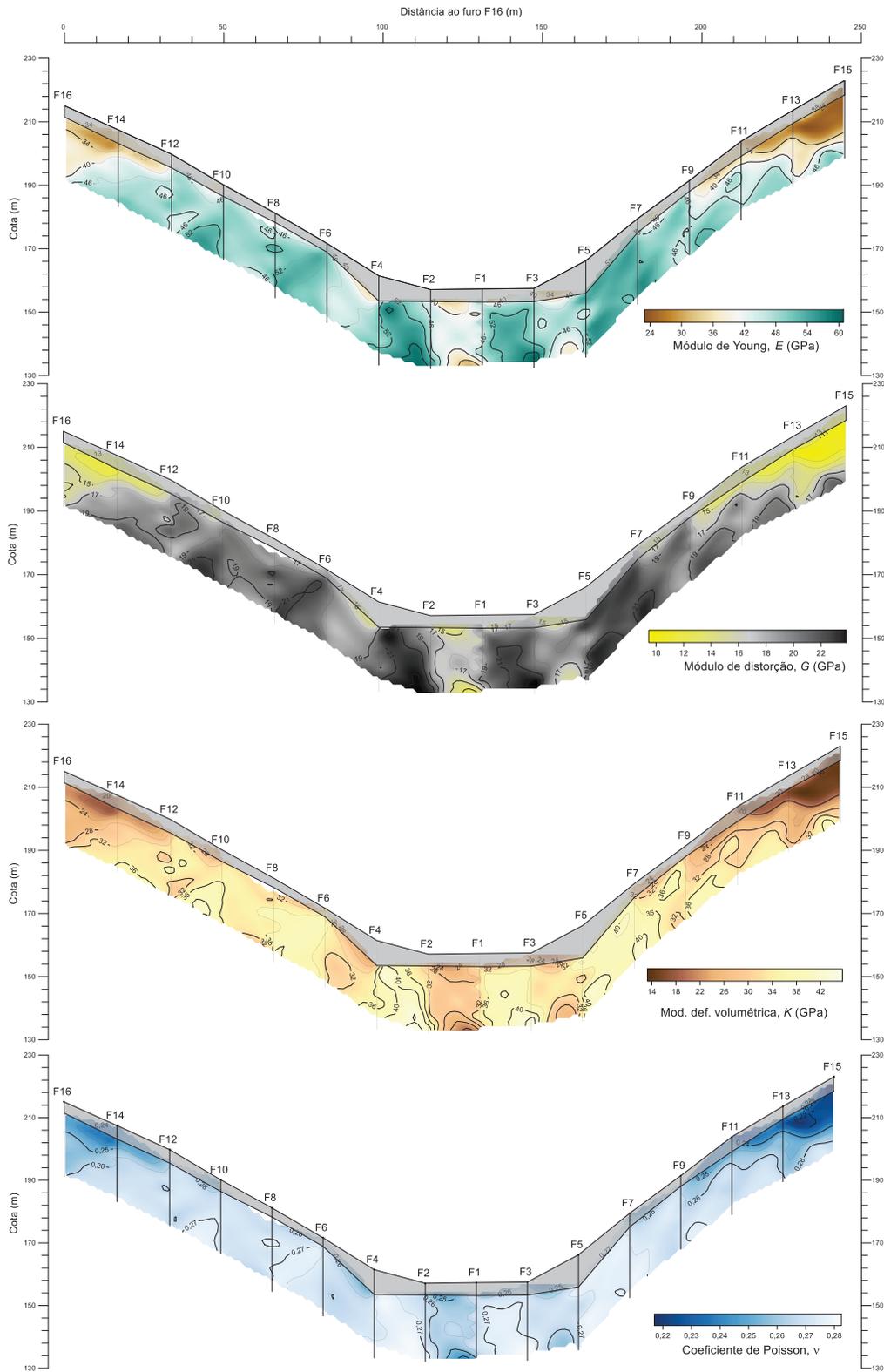


Figura 5 - Perfil da galeria perimetral da barragem de Daivões: distribuições bidimensionais estimadas dos parâmetros dinâmicos (LNEC, 2022a)

Apresentam-se no Quadro 3 alguns elementos estatísticos que sintetizam os principais resultados referentes aos parâmetros elásticos dinâmicos, obtidos com os ensaios de ultrassons, para os provetes “ambientes” e “saturados”. Esta análise foi feita para o conjunto dos 82 provetes e considerando duas classes de fraturação (F) e de alteração (W): $F=W=1$ e $F>1$ e/ou $W>1$.

Quadro 3 - Análise estatística dos parâmetros dinâmicos obtidos em laboratório, para os provetes “ambientes” e para os provetes “saturados” (adaptado de LNEC, 2022b)

	E (GPa)		G (GPa)		K (GPa)		v	
	“amb.”	“sat.”	“amb.”	“sat.”	“amb.”	“sat.”	“amb.”	“sat.”
todos os provetes								
Mínimo	4,3	8,7	1,7	3,6	3,0	3,8	0,1	0,1
Média	35,7	45,6	14,4	18,1	23,2	32,4	0,2	0,3
Mediana	36,5	47,9	15,1	18,9	24,3	35,3	0,2	0,3
Máximo	57,0	68,7	22,4	29,4	42,0	44,9	0,3	0,3
Desvio padrão	10,5	11,6	4,3	4,6	7,1	9,5	0,0	0,1
Coef. variação	29%	25%	30%	25%	31%	29%	18%	20%
provetes com $F > 1$ e/ou $W > 1$								
Mínimo	4,3	8,7	1,7	3,6	3,0	3,8	0,1	0,1
Média	30,1	40,3	12,1	16,3	20,3	26,4	0,2	0,2
Mediana	32,2	42,2	12,7	16,9	23,6	27,5	0,3	0,2
Máximo	49,0	68,7	21,0	29,4	35,3	44,9	0,3	0,3
Desvio padrão	12,8	14,9	5,3	6,0	9,1	11,0	0,0	0,1
Coef. variação	43%	37%	44%	37%	45%	42%	19%	25%
provetes com $F=1$ e $W=1$								
Mínimo	19,5	22,9	7,5	8,7	16,4	17,2	0,1	0,1
Média	39,1	48,9	15,9	19,3	25,0	36,1	0,2	0,3
Mediana	39,4	49,2	15,9	19,3	24,7	36,4	0,2	0,3
Máximo	57,0	62,6	22,4	26,0	42,0	44,8	0,3	0,3
Desvio padrão	6,7	7,2	2,8	3,0	4,7	5,9	0,0	0,0
Coef. variação	17%	15%	18%	16%	19%	16%	17%	14%

Destaca-se, desde logo, da análise deste quadro a influência que a alteração e a fraturação têm nos resultados, manifestada pelos menores valores do coeficiente de variação nos provetes de rocha de melhor qualidade ($W=F=1$).

4. CONCLUSÕES

As estimativas das distribuições 2D dos parâmetros dinâmicos, tal como era esperado, apresentam padrões semelhantes às distribuições bidimensionais de $V_{P-in situ}$ e de $V_{S-in situ}$. Os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza dos correspondentes parâmetros calculados a partir das velocidades ultrassónicas medidas em laboratório e estão em linha com os expectáveis para o tipo de maciço rochoso em questão.

Destaca-se ainda, da análise aos valores de V_{P-US} e de V_{S-US} obtidos em laboratório, e dos derivados parâmetros dinâmicos, que:

- os valores médios de V_{P-US} e de V_{S-US} , aumentam, com a saturação, de cerca de 3900 m/s e de 2300 m/s, respetivamente, para cerca de 4600 e 2600 m/s;

- os valores dos parâmetros elásticos dinâmicos apresentam valores semelhantes para os provetes “ambientes”, com valores médios do módulo de Young, por exemplo, de 35 e 36 GPa, respetivamente, e um aumento para 46 GPa em condições saturadas;
- os coeficientes de variação dos módulos de Young dinâmicos de provetes ambientes são ambos de 29%, e, em saturados, de 26%;
- a alteração e a fratura dos provetes têm clara influência na qualidade dos resultados obtidos, manifestada pelos menores valores do coeficiente de variação nos provetes de rocha em que $W=F=1$.

Os valores das velocidades de propagação das ondas ultrassónicas, e dos derivados parâmetros elásticos obtidos em laboratório, estão em concordância com os resultados de ensaios semelhantes, efetuados no âmbito do estudo geológico-geotécnico de apoio ao desenvolvimento do projeto (AQUALOGUS, CENOR e Iberinsa, 2011).

REFERÊNCIAS

- AQUALOGUS; CENOR; IBERINSA (2011). Aproveitamento Hidroeléctrico de Daivões. Projecto. Memória Geral. Anexo 2 – Estudo Geológico-Geotécnico.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L., Eastwood, R.L. (1985). Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks. *Geophysics* 1985:50(4), pp 571-581.
- 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.
- LNEC (2022a). Tomografia sísmica e módulos dinâmicos da fundação da barragem de Daivões (Sistema Eletroprodutor do Tâmega). Fase 3 (após o primeiro enchimento da albufeira). Relatório 262/2022.
- LNEC (2022b). Sistema eletroprodutor do Tâmega. Barragem de Daivões - Análise dos resultados dos ensaios laboratoriais de provetes de rocha do maciço de fundação. Relatório 322/2022.
- 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 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
- NP EN 1936 (2008). Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. IPQ.
- NP EN 14579 (2007). Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da velocidade de propagação do som. IPQ.
- SHERIFF, R. E. (1991). *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*. (3rd ed.). Society of Exploration Geophysicists.
- CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL 1:50.000 Folha 6-C Cabeceiras de Basto - Ministério da Indústria e Energia. Direção Geral de Geologia e Minas. Serviços Geológicos de Portugal (LNEG)