

LOCAL DO POÇO DE ACESSO À ESTAÇÃO DO HEROÍSMO DO METRO DO PORTO. ENSAIOS SÍSMICOS ENTRE FUIROS.

Marília Oliveira e Maria João Coelho

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia, Lisboa, Portugal

RESUMO: Na fase inicial de construção da estação do Heroísmo do Metro Ligeiro do Porto, com a execução do poço de acesso à estação, verificou-se a existência de grandes heterogeneidades no maciço rochoso local e envolvente à estação, especialmente, com a ocorrência de zonas com um estado de alteração e fracturação muito acentuado. Com o objectivo de averiguar, caracterizar e efectuar um zonamento do maciço granítico de uma forma mais detalhada, a pedido da Transmetro-ACE, o LNEC efectuou uma campanha de ensaios sísmicos entre furos de sondagem, em 10 secções, até profundidades da ordem dos 30m. Os dados obtidos nestes ensaios foram interpretados sob a forma de tomografias sísmicas de velocidade das ondas sísmicas de compressão (ondas P). Nesta comunicação apresenta-se a metodologia adoptada no estudo e os resultados obtidos.

1. INTRODUÇÃO

No Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto, a estação do Heroísmo localiza-se na zona de cruzamento da Rua do Heroísmo com a Rua António Carneiro no Porto. A estação pertence à Linha C, que liga os centros de interface da Campanhã e Trindade. A linha entre estas interfaces, com uma extensão de cerca de 2,3km, é definida em túnel, tendo-se projectado a estação do Heroísmo como uma estrutura subterrânea do tipo “caverna” e com poço de acesso.

Face às heterogeneidades manifestadas pelo maciço rochoso granítico (“Granito do Porto”), na zona de implantação do poço de acesso à estação, pela ocorrência em diversos estados de alteração e fracturação, realizaram-se ensaios sísmicos entre furos com o objectivo de caracterizar o local em termos de variação de velocidades de propagação das ondas P (também denominadas de compressão ou longitudinais). Tendo por base um conjunto de onze furos de sondagem (BH01 a BH011), até profundidades da ordem dos 30m, cuja localização se ilustra na Figura 1, procurou-se atingir com a realização destes ensaios uma maior abrangência em termos de zonamento, uma vez que são englobados maiores volumes de maciço na conjunto da cobertura efectuada com os raios sísmicos entre furos.

Em cada secção de ensaios, através do dispositivo geométrico de aquisição de dados, habitualmente designado por “leques sísmicos entre furos”, foi possível obter um varrimento de raios sísmicos que permitiu o processamento por tomografia sísmica (Coelho e Oliveira, 2001).

Os dados resultantes dos leques sísmicos entre furos foram então interpretados sob forma de tomografias bidimensionais de velocidades das ondas P, utilizando uma técnica de inversão iterativa.

Nesta comunicação resumem-se as condições geológicas locais, tendo como apoio os elementos fornecidos pelas sondagens mecânicas, a metodologia

utilizada em termos de técnica de ensaio e de cálculo e os principais resultados obtidos.

2. CONDIÇÕES GEOLÓGICAS E PROSPECÇÃO MECÂNICA

No local de estudo, Figura 1, o maciço rochoso que ocorre pertence à formação denominada por “Granito do Porto” de idade Hercínica. Apresenta-se em geral como um granito de grão médio, de duas micas, muito heterogéneo. Com base na classificação da Associação Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981), o granito encontrado varia desde medianamente alterado (W3) a muito alterado (W4), e por vezes, totalmente decomposto (saibro), correspondendo a um solo residual (W5, W6), mesmo a profundidades consideráveis. Podem ocorrer ainda blocos pouco alterados (“bolas” graníticas) muito resistentes e de dimensões variáveis, inseridos em granito praticamente decomposto. Em termos de fracturação do maciço, o seu grau de fracturação varia desde pouco a medianamente fracturado (F2 a F3) a muito fracturado (F5).

As várias campanhas de reconhecimento geológico-geotécnico, efectuadas de 1995 a 1999, com execução de variados tipos de ensaios e sondagens mecânicas, principalmente ao longo dos trechos subterrâneos, revelaram uma grande heterogeneidade do maciço rochoso, quer lateralmente quer em profundidade, tal como se mostra na Figura 2, num extracto do zonamento geotécnico ao longo da linha C (Carminé, 2000 e Fruguglietti et al., 2000), entre Campanhã e a zona do Heroísmo.

Do conjunto das onze sondagens efectuadas no local do poço de acesso (BH01 a BH11) destaca-se o facto de que todas as sondagens mostram que existe uma variação em profundidade do estado de alteração do granito, com zonas de passagem de um granito medianamente alterado a muito alterado, com graus de fracturação entre F3-F2 a F5, para um granito decomposto (saibro granítico) e vice versa.

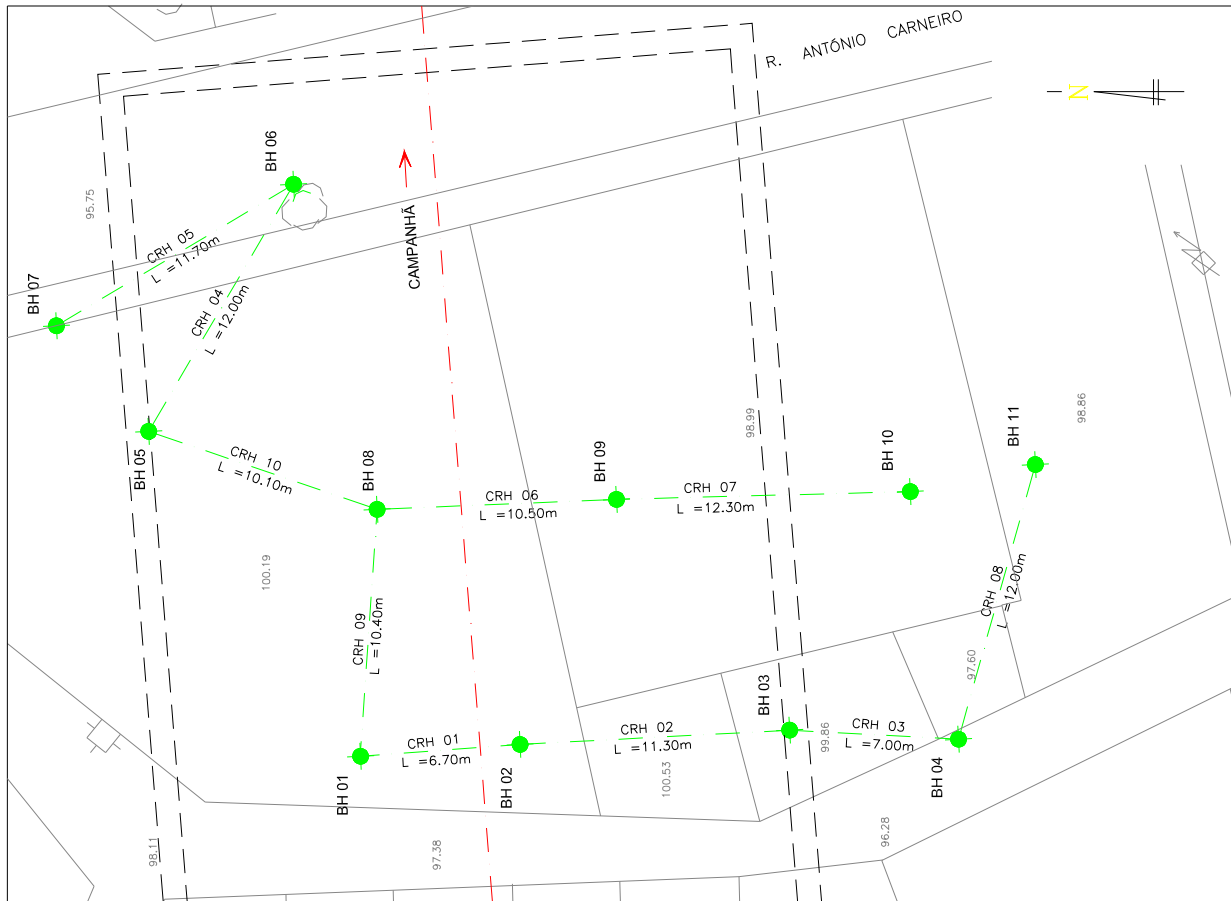


Figura 1. Planta da zona estudada com os furos de sondagem utilizados (BH01 a BH11) e com a implantação das secções sísmicas ensaiadas

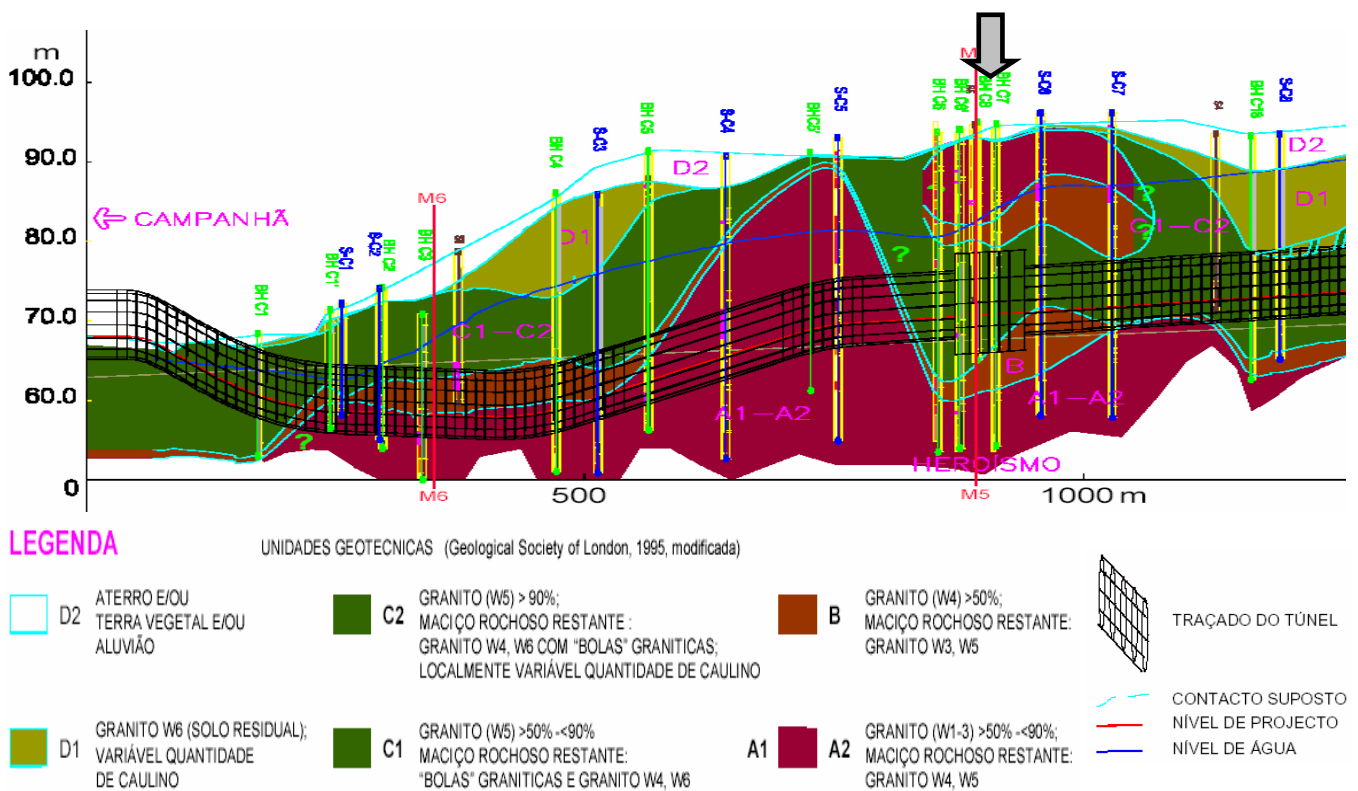


Figura 2. Zonamento geotécnico entre Campanhã e a zona da estação do Heroísmo. (Com base em elementos fornecidos pela Transmetro e segundo Carminé, 2000 e Fruguglietti et al., 2000)

Na figura 3 mostra-se em representação esquemática a informação fornecida pelas sondagens localizadas segundo os dois perfis de maior comprimento

(BH01-BH02-BH03-BH04 e BH08-BH09-BH10), os quais são bastante representativos do estado do maciço intersectado pelo conjunto de sondagens.

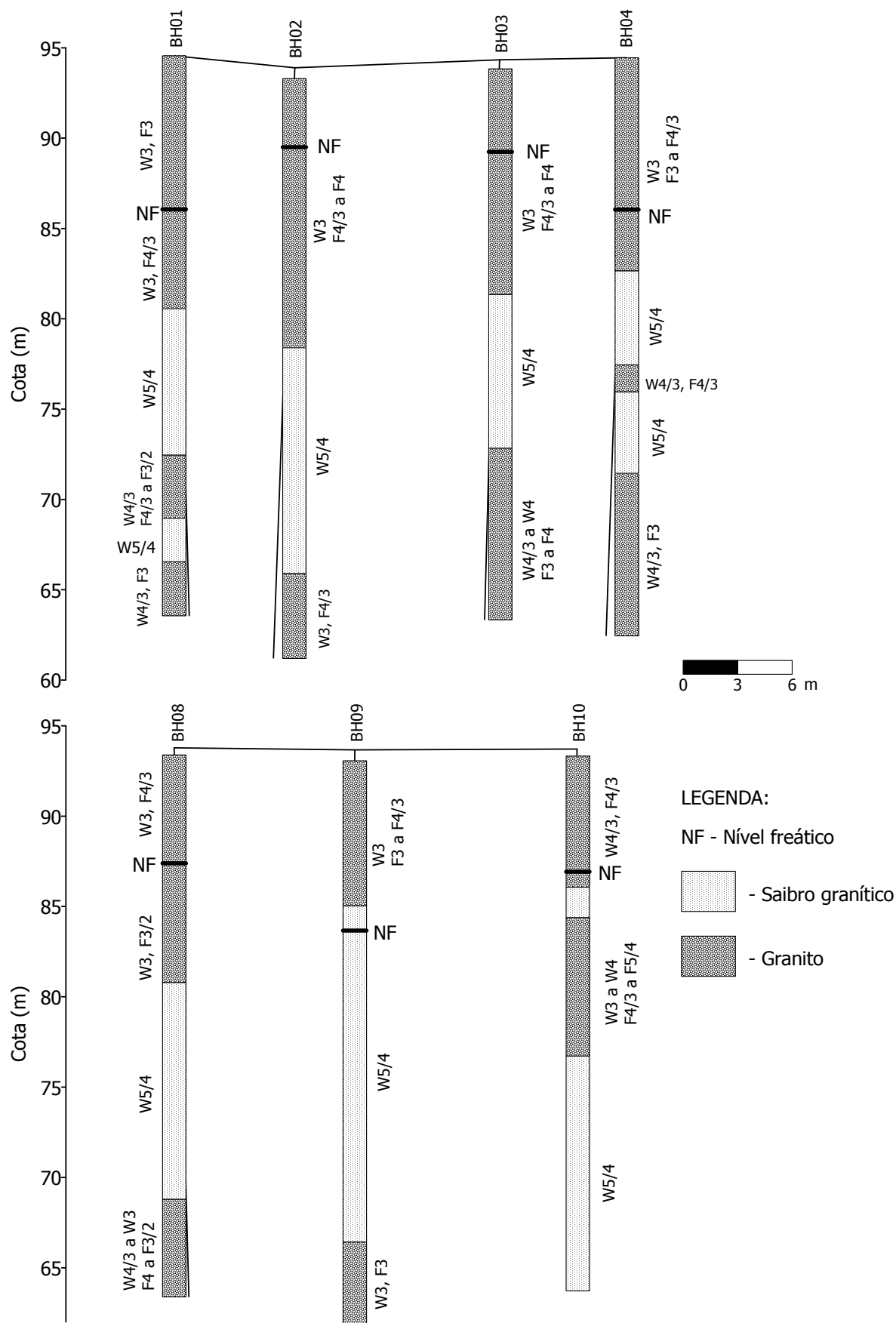


Figura 3. Informação geológica das sondagens mecânicas nos perfis BH01-BH02-BH03-BH04 e BH08-BH09-BH10. (Elementos fornecidos pela Transmetro)

Da análise da figura anterior verifica-se a ocorrência de algumas zonas de saibro granítico (W5/4) com muito baixa percentagem de recuperação. Em termos de localização, é de assinalar que estas zonas de saibro ocorrem a diferentes profundidades, mas com extensões em profundidade assinaláveis, tal como se verifica no local da sondagem BH10. Na região mais superficial, o granito encontra-se medianamente alterado a muito alterado (W3, W4/3) com uma fracturação que varia de afastada a próxima, e com algumas passagens intermédias (F3/2, F3, F4/3).

No conjunto de furos, o nível da água oscilou entre os cerca de 4,5 e 10m de profundidade.

3. ENSAIOS SÍSMICOS ENTRE FUROS

Nas secções entre furos assinaladas na planta da Figura 1 (CRH01 a CRH10) foram efectuados ensaios sísmicos com um dispositivo geométrico designado por “leques sísmicos entre furos”, para obtenção de tomografias de velocidade de propagação das ondas de compressão (ondas P) nas secções ensaiadas (Coelho e Oliveira, 2001). Apresentam-se aqui os resultados obtidos no perfil BH01-BH02-BH03-BH04, formado pelas secções contíguas CRH01-CRH02-CRH03, e no perfil BH08-BH09-BH10, formado pelas secções contíguas CRH06-CRH07 (Figura 1).

3.1 Aquisição de dados (leques sísmicos)

O dispositivo de aquisição de dados designado por “leques sísmicos entre furos” consiste em colocar uma fonte de energia sísmica a profundidades sucessivas num furo de sondagem, e em registar as ondas sísmicas assim geradas, em diversos receptores colocados ao longo de um furo adjacente, tal como é ilustrado na Figura 4. Esta multiplicidade de posições da fonte sísmica e dos receptores ao longo dos furos gera assim leques de raios sísmicos e tem como objectivo produzir uma elevada densidade espacial e uma cobertura angular de raios sísmicos o mais completa possível, na secção entre furos. Descrições mais detalhadas do método dos leques sísmicos para obtenção de tomografias, podem ser encontradas, por exemplo, em Pessoa (1990), Jackson e McCann (1997) e Coelho (2000).

Os métodos de prospecção sísmica entre furos de sondagem, apresentam, relativamente aos métodos sísmicos clássicos da refração e da reflexão, aplicados na superfície do terreno, e dependendo da aplicação em causa, algumas vantagens, tais como (ISRM, 1988):

- redução da influência perturbadora dos terrenos de cobertura;
- diminuição do trajecto das ondas sísmicas para uma mesma área de investigação;

- as primeiras ondas detectadas pelos receptores são normalmente as ondas directas correspondentes aos raios sísmicos rectilíneos;
- eventual detecção de zonas de baixa velocidade, subjacentes a zonas de velocidade superior.

No entanto, há que ter em conta que a hipótese de que as primeiras ondas detectadas pelos receptores correspondem aos trajectos rectilíneos (directos) é tanto menos realista quanto maior forem as distâncias entre as fontes sísmicas e os receptores e/ou quanto maior forem os contrastes de velocidade no(s) meio(s) atravessado(s) pelas ondas, situações em que aumenta a probabilidade das primeiras ondas serem refractadas e não directas (princípio de Fermat ou do tempo mínimo).

A interpretação dos dados obtidos nos leques sísmicos entre furos é normalmente efectuada através da técnica da tomografia sísmica de velocidade das ondas de compressão (ondas P) tal como foi realizado para os perfis aqui apresentados.

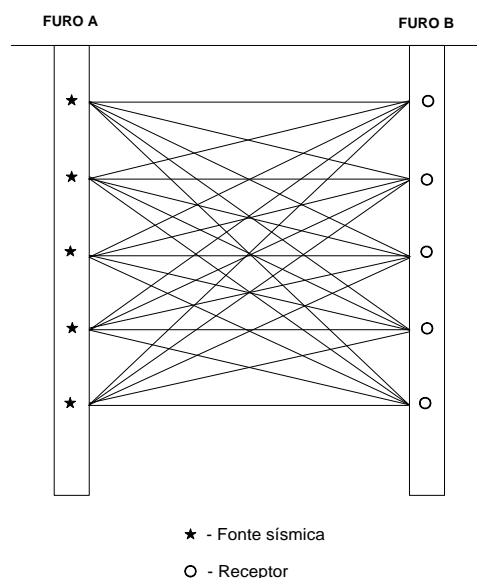


Figura 4. Leques sísmicos entre furos

Nos leques sísmicos efectuados nas secções CRH01-CRH02-CRH03 e CRH06-CRH07 (Figura 1), o espaçamento entre receptores e fontes sísmicas ao longo dos furos foi, regra geral, de 1,5m. As distâncias entre furos variavam entre cerca de 6,7 m (secção CRH01) e 12,3m (secção CRH07). Como fonte sísmica utilizaram-se cápsulas de detonação eléctrica instantânea e como receptores foram utilizados geofones moldados em cabo, de marca Oyo Corporation. O sistema de aquisição digital dos registos sísmicos foi um sismógrafo ABEM Terraloc MKIII de 12 canais. De um modo geral os sinais sísmicos apresentaram boa relação sinal/ruído permitindo a detecção visual das primeiras ondas P sem pré-processamento. Os sinais com elevado nível de

ruído ou cujos tempos das primeiras chegadas saíam fora da gama de velocidades esperadas, foram rejeitados.

Os furos utilizados são sub-verticais tendo-se efectuado o seu levantamento inclinométrico para avaliar os respectivos desvios da vertical. Uma vez que o programa de cálculo de tomografia sísmica utilizado, apenas admite furos rectilíneos foi necessário estimar uma inclinação e azimute médios para cada um dos furos levantados, a partir dos resultados dos respectivos levantamentos inclinométricos, antes de efectuar o processamento dos dados sísmicos. Os furos apresentaram pequenos desvios da vertical, não excedendo 2,1° de inclinação média. Estes valores médios, de inclinação e azimute, foram utilizados para o cálculo das velocidades reais dos raios sísmicos e para a definição da geometria dos planos tomográficos dos perfis a analisar.

Uma vez que os furos de sondagem BH01 a BH04 são aproximadamente coplanares, as secções CRH01-CRH02-CRH03 previamente planificadas foram rebatidas num único plano tomográfico, de modo a obter-se uma tomografia sísmica do perfil BH01-BH02-BH03-BH04, a partir do conjunto dos raios sísmicos das três secções adjacentes. Do mesmo modo, definiu-se o plano tomográfico formado pelas secções CRH06-CRH07 para obtenção duma tomografia do perfil BH08-BH09-BH10, a partir do conjunto de raios das duas secções adjacentes definidas pelos furos BH08 a BH10 (também aproximadamente coplanares).

O numero total de raios sísmicos considerado para as tomografias sísmicas, foi de 926 para o perfil BH01-BH02-BH03-BH04 (incluindo os raios das três secções CRH01-CRH02-CRH03) e de 741 para o perfil BH08-BH09-BH10 (incluindo os raios das duas secções CRH06-CRH07), tendo estes raios as distribuições representadas na Figura 5.

3.2 Tomografia sísmica entre furos

Na tomografia sísmica entre furos aqui considerada o objectivo é a obtenção do modelo da distribuição (ou campo) da velocidade de propagação das ondas de compressão numa secção ou perfil entre dois ou mais furos, a partir de uma densa cobertura de raios sísmicos, como a obtida pelos leques sísmicos.

A aplicação da tomografia de velocidades de propagação de ondas sísmicas de compressão (ondas P) baseia-se no facto destas ondas serem as mais rápidas e de mais fácil identificação nos registos sísmicos. Entre as ondas P, as de menor tempo de percurso entre a fonte sísmica e um dado receptor, são normalmente, no caso dos leques sísmicos entre furos, as ondas "directas" correspondentes aos trajectos mais curtos entre a fonte e o receptor, ou seja, aos raios sísmicos (aproximadamente) rectilíneos (uma vez que a propagação de ondas é, na maioria

das situações, convenientemente descrita por raios perpendiculares à frente de onda). Isto devido às curtas distâncias entre fontes e receptores, utilizadas nestes ensaios. Estas considerações só são exactas num meio de velocidade constante (e isotrópico), mas constituem uma boa aproximação quando os contrastes de velocidade são pequenos. Mesmo quando os contrastes de velocidade são elevados, situação em que há maior curvatura dos raios, a aproximação dos raios rectilíneos, embora menos realista, permite normalmente a identificação das principais heterogeneidades do campo das velocidades.

Os parâmetros do modelo a determinar são então as velocidades de propagação das ondas P em cada ponto da secção ou perfil em estudo, a partir dos valores medidos (observados) dos tempos de propagação destas ondas no seu interior. A esta inferência indirecta da distribuição de velocidades, a partir dos valores observados para os tempos, chama-se reconstrução ou inversão tomográfica. Os dados disponíveis *a priori* para a resolução do problema, são, além dos tempos experimentais de percurso das ondas, que são atribuídos aos raios sísmicos, a geometria do dispositivo fontes sísmicas / receptores e da própria secção (ou perfil). A inversão ou reconstrução da distribuição das velocidades a partir dos tempos de percurso, e os diversos algoritmos utilizados são bem descritos na literatura da especialidade, nomeadamente em Nolet (1987), Pessoa (1990), Lo e Inderwiesen (1994).

Em termos práticos os tempos experimentais observados para os raios sísmicos são invertidos numa matriz de velocidades (malha de células) na área coberta pelos raios. A partir de uma matriz (modelo) inicial de velocidades, para a qual se calculam os tempos teóricos dos raios sísmicos (considerados rectilíneos) e a partir das diferenças entre estes tempos teóricos e os tempos observados para os mesmos raios (diferenças estas designadas por "tempos residuais"), o processo iterativo inicia-se procedendo a sucessivas correcções do modelo de velocidades de modo a minimizar os "tempos residuais", ou seja, de modo a que, cada modelo corrigido, em cada iteração, produza tempos teóricos dos raios cada vez mais próximos dos tempos observados.

O algoritmo de inversão tomográfica utilizado foi do tipo SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*) através de um programa de cálculo automático implementado por Pessoa (1990), considera raios rectilíneos, velocidade constante em cada célula do modelo e constrangimentos das velocidades mínima e máxima do modelo.

Entre os resultados das várias iterações é escolhido o modelo que se admite como a melhor estimativa, ainda que não se tenha atingido a convergência numérica dos "tempos residuais". A escolha dos modelos é baseada em parâmetros quantitativos e em factores qualitativos ou de interpretação.

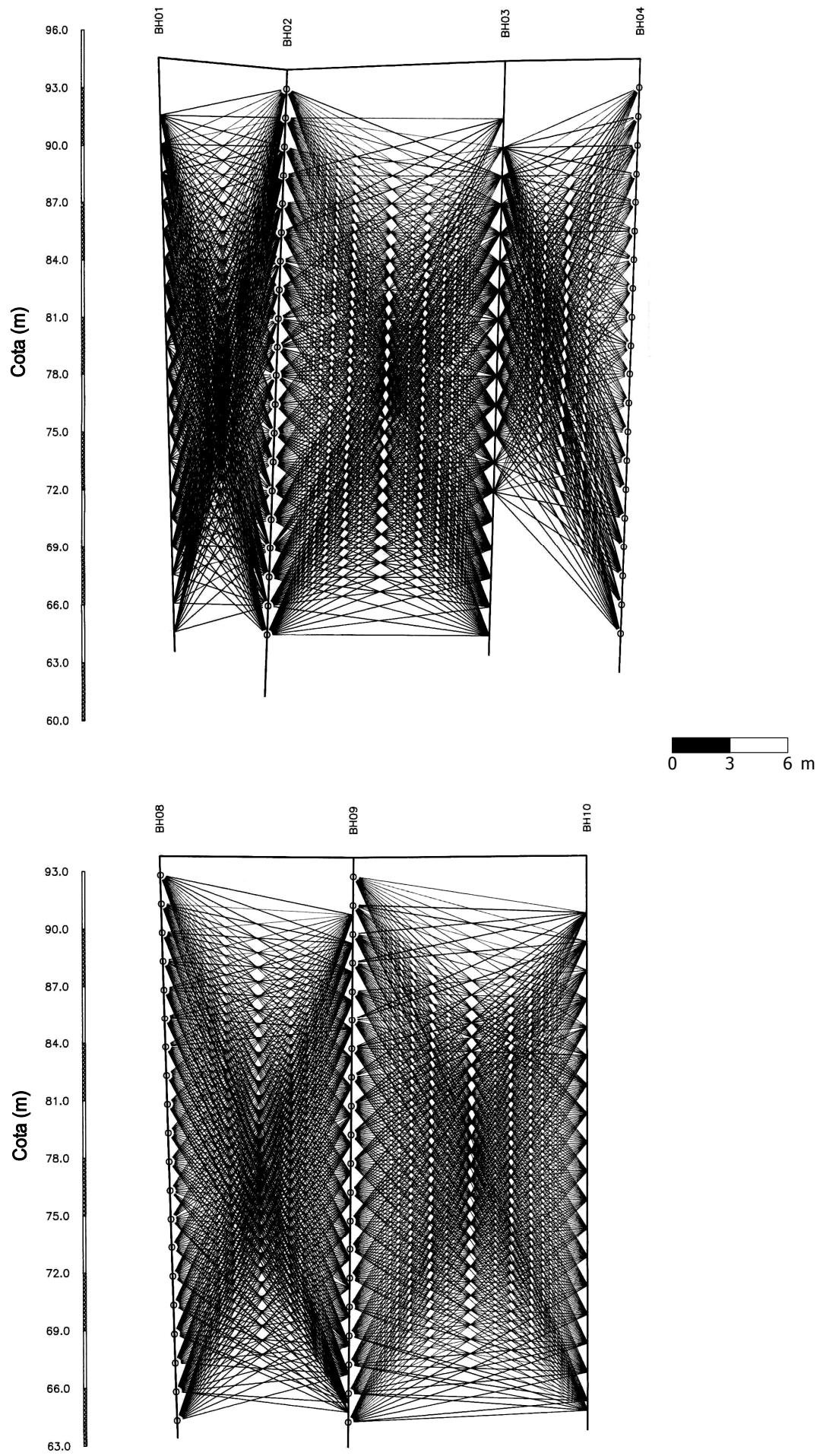


Figura 5. Coberturas de raios sísmicos nos perfis BH01-BH02-BH03-BH04 e BH08-BH09-BH10

Os parâmetros quantitativos são:

- os valores dos erros residuais médio e máximo (valores percentuais correspondentes às divisões da média e do máximo dos valores absolutos dos “tempos residuais”, pela média dos tempos observados), que definem assim parâmetros indicadores do ajuste matemático dos modelos escolhidos aos respectivos tempos observados para os raios sísmicos;
- as velocidades mínima, média e máxima do modelo tomográfico de velocidades, especialmente a velocidade média, que deve ser da mesma ordem da média das velocidades dos raios sísmicos.

Os factores qualitativos de maior relevância relacionam-se com o eventual aparecimento e/ou desenvolvimento de falsas anomalias que ocorrem frequentemente após as primeiras quatro iterações.

O perfil tomográfico BH01-BH02-BH03-BH04 foi discretizado com uma malha de células rectangulares com 1m na horizontal por 1,5m na vertical e o perfil BH08-BH09-BH10 foi discretizado com uma malha de células quadradas com 1,5m de lado (Figura 6).

Como modelos iniciais de velocidade, para iniciar os processos iterativos de inversão, foram utilizados, em ambos os casos, modelos de velocidade uniforme igual à média das velocidades dos raios sísmicos de cada perfil analisado.

O factor de convergência numérica (utilizado na convergência dos tempos teóricos aos tempos observados) foi em qualquer dos casos de 0.05ms (milisegundo), correspondendo a menos de 1% do valor médio dos tempos observados em cada perfil. Apesar de ser superior ao erro de leitura dos tempos, considerou-se este valor como sendo da ordem de grandeza do erro experimental, tendo em conta os eventuais erros de posicionamento das fontes e receptores ao longo dos furos.

As tomografias apresentadas na Figura 6 correspondem aos modelos escolhidos como as melhores estimativas dos campos das velocidades, obtidos por inversão tomográfica, para cada um dos perfis analisados, ainda que não tenham atingido a convergência numérica dos “tempos residuais”. No caso do perfil BH01-BH02-BH03-BH04, o modelo escolhido foi obtido na 2ª iteração, enquanto que no caso do perfil BH08-BH09-BH10 a tomografia apresentada corresponde ao modelo obtido na 4ª iteração.

Os erros residuais médios dos modelos tomográficos foram de 10% no modelo do perfil BH01-BH02-BH03-BH04 e 7% no modelo do perfil BH08-BH09-BH10, o que, juntamente com o facto

das velocidades médias das células dos modelos serem muito próximas das médias das velocidades dos raios sísmicos que intersectam cada perfil, evidencia elevada concordância (correlação) dos modelos geofísicos, na generalidade, com os tempos medidos para os raios sísmicos.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As tomografias sísmicas obtidas delineiam as principais heterogeneidades do maciço investigado e caracterizam, em termos de velocidade de propagação das ondas P, as suas diferentes estruturas tendo permitido um zonamento de elevada resolução em função dos raios sísmicos disponíveis.

Os modelos tomográficos apresentam variações acentuadas e frequentes inversões da velocidade das ondas P, quer em profundidade, quer lateralmente, reflectindo um maciço heterogéneo, com distribuição irregular do estado de alteração e do grau de fracturação.

As inversões e os gradientes mais significativos da velocidade apresentam, de um modo geral, uma elevada correlação com a informação fornecida pelas sondagens mecânicas dos furos utilizados, nomeadamente no que diz respeito aos estado de alteração (desde granito medianamente alterado a saibro granítico) e de fracturação do maciço. Esta correlação permite deduzir, a partir das tomografias sísmicas, a qualidade mecânica do maciço nos espaços entre furos.

De um modo geral, a região mais profunda dos perfis analisados apresenta, em média, velocidades relativamente mais elevadas do que a região superficial. Esta tendência do campo da velocidade tem certamente uma forte influência do estado de saturação do maciço, que na região mais profunda está saturado, em contraste com a região acima do nível freático, podendo contudo, ser também indicativa de uma melhoria da qualidade mecânica do maciço e/ou estar relacionada com o aumento do estado de tensão (compressão) em profundidade.

As zonas de menor velocidade (inferior a 1500m/s) ocorrem tipicamente na região mais superficial do maciço, onde certamente se encontra mais alterado (ou decomposto), mais fracturado, mais descomprimido e, provavelmente acima do nível freático. Saliente-se contudo que ocorrem simultaneamente na região superficial, algumas zonas de velocidade relativamente elevada (superior a 2500m/s), das quais se destacam as observadas junto aos furos BH01, BH03 e BH09. Estas regiões superficiais com maior velocidade deverão corresponder a zonas do maciço granítico com melhor qualidade mecânica.

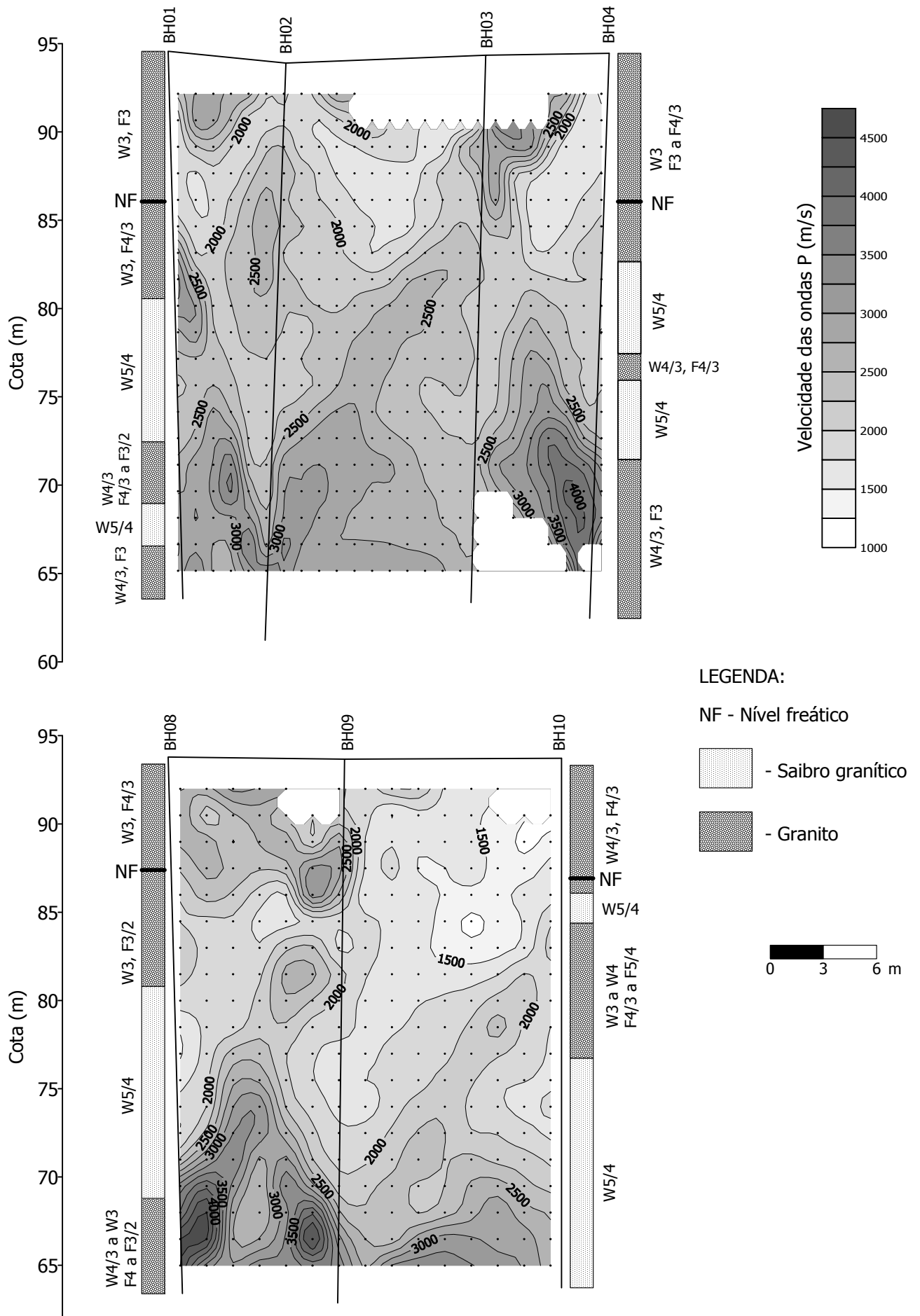


Figura 6. Tomografias sísmicas de velocidade das ondas P dos perfis BH01-BH02-BH03-BH04 e BH08-BH09-BH10

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios sísmicos entre furos efectuados no local do poço de acesso à estação do Heroísmo do Metro do Porto permitiram apontar as seguintes conclusões:

- Os ensaios sísmicos entre furos, com interpretação sob a forma de tomografias sísmicas entre furos, permitiram um zonamento com elevada resolução do maciço rochoso investigado, em termos da velocidade de propagação das ondas P, e, por correlação com a informação das sondagens mecânicas, permitiram inclusivamente inferir acerca da sua qualidade mecânica;
- As tomografias sísmicas obtidas são características de um maciço rochoso de qualidade mecânica muito variável e heterogénea, quer em profundidade, quer lateralmente, com distribuição irregular do estado de alteração e do grau de fracturação;
- Finalmente, é de assinalar a informação adicional fornecida por estes ensaios, complementando assim, os dados fornecidos pela prospecção mecânica.

AGRADECIMENTO

À Normetro e Transmetro – ACE, agradece-se pela possibilidade de incluir a informação respeitante a este trabalho.

REFERÊNCIAS

Carminé P. 2000. Condições Geológico-Geotécnicas ao longo dos troços enterrados do sistema de metro ligeiro da área metropolitana do Porto. 7º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.

Coelho, M. J. 2000. Aplicações geotécnicas da tomografia sísmica entre furos. Trabalho de síntese, Provas de Assistente de Investigação do LNEC, LNEC, Lisboa: 163.

Coelho, M. J. e M. Oliveira 2001. Tomografias sísmicas entre furos no local do poço de acesso à estação do Heroísmo. LNEC, Relatório, Lisboa: 77.

Fruguglietti, A., M. Gasparini, S. Centis 2000. Influence of geotechnical conditions on the excavation method of “Metro do Porto” project. 7º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.

ISRM 1981. Rock characterization, testing and monitoring – ISRM Suggested Methods. Editor: E. T. Brown, Pergamon Press Ltd, England.

ISRM 1988. Suggested methods for seismic testing within and between boreholes. ISRM, Commission on testing methods, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, pp. 447-472.

Jackson, P.D. e McCann, D. 1997. Cross-hole seismic tomography for engineering site investigation. Modern Geophysics in Engineering Geology, Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 12, pp. 247-264.

Lo, T. e P. Inderwiesen 1994. Fundamentals of seismic tomography. SEG, Geophysical Monograph Series, Nº 6, D.V. Fitterman Series Editor, USA: 174.

Nolet, G. Ed. 1987. Seismic tomography with applications in global seismology and exploration geophysics. D. Reidel Publishing Company: 386.

Pessoa, J. 1990. Aplicação de técnicas tomográficas à prospecção sísmica entre furos de sondagem. Trabalho de síntese, Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, Universidade de Aveiro: 210.