

CAMPO EXPERIMENTAL DO LNEC – CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR: SONDAGENS E APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS

LNEC EXPERIMENTAL SITE – PRELIMINARY CHARACTERIZATION: BOREHOLES AND GEOPHYSICAL METHODS APPLICATION

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

Santos, Jaime, *IST, Lisboa, Portugal, jaime@civil.ist.utl.pt*

Pereira, Marília, *LNEC, Lisboa, Portugal, marilia@lnec.pt*

Sacadura, Carlos, *Geocontrolo SA, Lisboa, Portugal, carlossacadura@geocontrolo.pt*

Jeremias, Filipe Telmo, *LNEC, Lisboa, Portugal, ftelmo@lnec.pt*

RESUMO

O Campo Experimental do LNEC, para ensaios geofísicos e geotécnicos, situa-se no *campus* do LNEC, na região nordeste de Lisboa, onde ocorrem formações miocénicas. Inicialmente foram aplicados no sítio os métodos geofísicos da refração sísmica e das ondas superficiais, que forneceram estimativas da estratificação e das respectivas velocidades das ondas sísmicas P e S. Posteriormente foram executadas sondagens mecânicas e alguns ensaios de caracterização *in situ*, incluindo ensaios sísmicos entre furos. Nesta comunicação analisam-se os resultados dos diversos ensaios efectuados, com base nos quais se obteve a caracterização geológico-geotécnica preliminar do sítio do referido Campo Experimental.

ABSTRACT

The LNEC Experimental Site for geophysical and geotechnical tests was implemented in the LNEC *campus*, at Lisbon northeast, where miocenic formations exist. The seismic refraction method and the surface wave method were there initially applied, from which first geophysical models for the local stratification and their P and S seismic wave velocities were obtained. Later some boreholes and *in situ* characterization tests, including crosshole seismic tests, were carried out at the same local. The results from these several tests executed at the site are here analysed and, based on that, a preliminary site geotechnical characterization is presented.

1. INTRODUÇÃO

Com vista à implantação de um Campo Experimental para ensaios geofísicos e geotécnicos, o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) disponibilizou no seu *campus* uma área livre com cerca de 35x100m². O *campus* do LNEC, que ocupa uma área total de cerca de 22 hectares, localiza-se na região nordeste de Lisboa onde ocorrem formações miocénicas.

Além de alguns estudos anteriores, foram recentemente aplicados neste Campo Experimental os métodos geofísicos da refração sísmica (de ondas P) e das ondas sísmicas superficiais (de Rayleigh), não só com o objectivo de estimar a estratificação do sítio e as respectivas velocidades das ondas sísmicas P e S, V_P e V_S , como também para o estudo e aferição de diversos dispositivos experimentais do método das ondas superficiais, no âmbito do trabalho de investigação realizado por Coelho (2009), sobre esse método.

Posteriormente foram executadas, pela Geocontrole SA, três sondagens mecânicas (S1 a S3) com cerca de 41m de profundidade, distanciadas de cerca de 5m e dispostas em triângulo, no local de aquisição dos referidos dados geofísicos. A Geocontrole SA procedeu ainda à recolha de amostras indeformadas e efectuou ensaios SPT e pressiómetricos do tipo “Menard”. Um dos furos foi instrumentado com piezómetros para avaliação dos níveis de água em profundidade. Entre os dois primeiros furos de sondagem o LNEC realizou posteriormente ensaios sísmicos entre furos, pelos quais se obteve a distribuição vertical detalhada das velocidades V_p e V_s , na secção entre furos (Coelho, 2009). A partir das amostras recolhidas nas sondagens efectuaram-se ensaios de identificação e de caracterização física dos materiais amostrados. Foram igualmente realizados ensaios de coluna ressonante para determinação laboratorial da velocidade da onda de corte ($V_{s,lab}$) nos materiais de três amostras indeformadas.

Os resultados das sondagens mecânicas e dos ensaios efectuados nos furos e entre furos, permitiram aferir e calibrar os modelos geofísicos iniciais, mostrando, no entanto, que estes modelos forneceram boas aproximações da estratificação local e das distribuições verticais de V_p e de V_s , revelando assim a eficácia dos métodos geofísicos utilizados na caracterização prévia do sítio, mesmo antes da realização das sondagens e dos ensaios sísmicos entre furos.

Nas secções seguintes apresenta-se o enquadramento geológico do sítio e analisam-se os resultados dos ensaios realizados (laboratoriais e *in situ*), que permitiram obter a caracterização geotécnica preliminar do Campo Experimental do LNEC.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO, SONDAJENS E ENSAIOS MECÂNICOS IN SITU

2.1. Enquadramento geológico

No *campus* do LNEC ocorrem três formações miocénicas com significativa representatividade na área de Lisboa, nomeadamente as formações: “Argilas de Forno do Tijolo” (M_{IVa}), “Areias de Quinta do Bacalhau” (M_{IVb}) e “Calcário de Casal Vistoso” (M_{Va1}), de acordo com a Folha 34-D (Lisboa) da Carta Geológica de Portugal (1:50000) e respectiva Notícia Explicativa (INETI, 2006), e com a Folha 2 da Carta Geológica do Concelho de Lisboa (1:10000), SGP (1986).

As formações miocénicas afloram em grande parte das regiões sul e leste de Lisboa e correspondem a diversas sequências deposicionais com alternância entre unidades marinhas, salobras e continentais (INETI, 2006). Em termos estratigráficos, a base deste complexo miocénico assenta sobre a “Formação de Benfica” de idade paleogénica e de origem continental. De um modo geral, as camadas das formações miocénicas inclinam ligeiramente para leste (cerca de 4 a 5°).

Nas referidas cartas geológicas está ainda mapeada uma aluvião superficial, geneticamente relacionada com a dinâmica deposicional processada na linha de água que outrora sulcaria os terrenos do *campus* do LNEC, incluindo a zona do Campo Experimental.

Na zona destinada ao Campo Experimental do LNEC, abaixo de uma cobertura superficial e eventualmente de terrenos aluvionares, ocorre, a partir de cerca de 3m de profundidade, a formação “Areias de Quinta do Bacalhau” até cerca de 17,5m de profundidade. Subjacente a esta formação ocorre a formação “Argilas de Forno do Tijolo”.

A planta esquemática da Figura 1 ilustra a localização relativa no Campo Experimental do LNEC, dos furos de sondagem, S1, S2 e S3, dispostos em triângulo, e afastados entre si cerca de 5m, bem como dos perfis sísmicos (de refração), PA e P5L, com direcção aproximada Oeste-

Leste, e do ponto SW5, correspondente ao ponto central dos perfis de aquisição de dados de ondas superficiais, colineares com o perfil P5L (ver secção 3). Tal como se pode observar, os furos S1 e S2 foram efectuados sobre o alinhamento P5L, em torno do ponto central SW5.

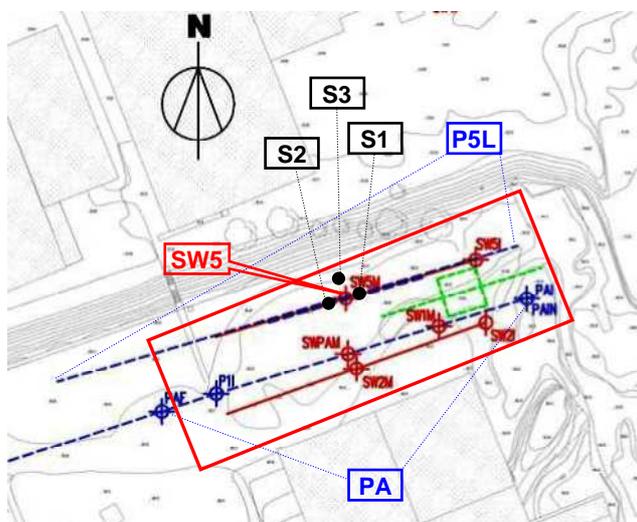


Figura 1 – Planta esquemática do Campo Experimental do LNEC (escala ~ 1:2000) com a localização dos perfis sísmicos PA e P5L, do ponto SW5 e dos furos de sondagem S1, S2 e S3.

Em termos topográficos, a área do campo experimental é praticamente plana com uma cota média de cerca de 89m (em relação ao *Datum* Lisboa). Uma vez que as variações de cota são desprezáveis, considerou-se que, quer as sondagens, quer os perfis onde se aplicaram os métodos geofísicos, se localizam na mesma cota e que esta é constante ao longo destes perfis.

2.2. Sondagens e ensaios mecânicos *in situ*

No furo de sondagem S1, efectuado à rotação, realizou-se amostragem contínua e executaram-se ensaios SPT, e no furo de sondagem S2 efectuaram-se ensaios pressiométricos “Menard” e recolheram-se algumas amostras indeformadas. No furo de sondagem S3, executado com furação destrutiva, instalaram-se três piezómetros para medição dos níveis de água no furo a diferentes profundidades. Os resultados dos ensaios SPT aqui apresentados, N_{SPT} , correspondem ao número de pancadas medidas, sem correcções, tendo sido usado nos ensaios o critério de paragem de 60 pancadas, adoptado na prática portuguesa.

As sondagens mecânicas intersectaram superficialmente um aterro heterogéneo até cerca de 1,5m de profundidade. Entre 1,5 e 3m de profundidade intersectaram uma camada de areia média a fina, silto-argilosa, solta e de cor castanha; este material deve eventualmente corresponder à aluvião marcada na carta geológica. Obteve-se $N_{SPT}=8$ no ensaio SPT efectuado a 1,5m de profundidade.

Entre 3 e 17,5m de profundidade, foi intersectada a formação miocénica “Areias de Quinta do Bacalhau”, aqui constituída essencialmente, até cerca dos 10m, por areia média a grossa, com passagens siltosas e argilosas, medianamente a muito compacta, com cor acastanhada a amarelada e acinzentada; entre cerca de 10 e 17,5m, esta formação é constituída por areia média a grossa, siltosa, com seixo silicioso, muito compacta e de cor amarelada a alaranjada. Nesta formação obtiveram-se valores de N_{SPT} entre 15 e >60 , aumentando em profundidade.

Entre cerca de 17,5m e 20m, as sondagens intersectaram uma camada de silte arenoso, de consistência rija e de cor esverdeada, com $N_{SPT}=35$ a 46. Esta camada constitui o topo da formação miocénica “Argilas de Forno do Tijolo”. A partir de cerca de 20m de profundidade, e

até 41m de profundidade (máxima profundidade atingida pelas sondagens), foi intersectada a mesma formação “Argilas de Forno de Tijolo”, consistindo aqui essencialmente em siltes argilosos, de consistência rija e de cor cinzenta escura azulada, e ainda, entre cerca de 39 e 41m, com passagens calcareníticas fossilíferas (“cascões”). Para estas profundidades, abaixo de 20m (excepto a 22,5m, onde $N_{SPT}=57$), obteve-se até ao fim da sondagem S1, $N_{SPT}>60$.

No furo de sondagem S3 foram instalados três piezómetros, P1 a P3, nas seguintes profundidades: P1 a 40,7m, P2 a 35,5m e P3 a 17m. De acordo com os níveis de água medidos nos piezómetros, o nível freático no local das sondagens (e por extrapolação, para toda a região do Campo Experimental) ocorre a cerca de 15,5m de profundidade, o que implica certamente o estado de saturação dos materiais subjacentes a esse nível.

Foram realizados ensaios laboratoriais de identificação e de caracterização física em algumas das amostras indeformadas recolhidas na sondagem S2 e em algumas amostras (remexidas) recolhidas na sondagem S1. A recuperação das areias da formação “Areias de Quinta do Bacalhau” foi muito baixa, quer na sondagem S1, quer na sondagem S2, impedindo mesmo a colheita de amostras indeformadas nesta formação. Deste modo, apenas puderam ser ensaiadas amostras (remexidas) desta formação, recolhidas na sondagem S1. As amostras indeformadas recolhidas no furo S2, às profundidades de 2,5m, 17,2m e 27,0m, foram ainda submetidas a ensaios de caracterização mecânica na coluna ressonante (CR) para determinação dos valores laboratoriais da velocidade da onda de corte, $V_{S,lab}$, nos materiais amostrados. Os resultados são ilustrados na Figura 3 (secção 4).

Os resultados dos ensaios SPT executados ao longo da sondagem S1, entre 1,5 e 39m de profundidade, com intervalo de medição de 1,5m, são ilustrados graficamente na Figura 3 (secção 4). Os resultados dos ensaios pressiométricos efectuados no furo S2 às profundidades: 3,70m, 6,70m, 15,50m, 18,60m e 24,00m, são resumidos no Quadro 1 (secção 5).

3. PROSPECÇÃO SÍSMICA

3.1. Método da refração sísmica

A aplicação deste método no Campo Experimental forneceu uma primeira estimativa da estratificação local e da respectiva distribuição vertical da velocidade da onda P (V_P). Indirectamente, permitiu ainda inferir a profundidade aproximada do nível freático. Foram efectuados dois perfis de refração sísmica, designados por PA e P5L, cuja localização e orientação são indicadas na Figura 1. Nos dois casos os dados foram processados e interpretados pelo método clássico dos tempos de intersecção, assumindo um modelo de camadas horizontais para cada posição da fonte sísmica. Em ambos os perfis a fonte sísmica utilizada consistiu na detonação de uma pequena carga explosiva (~20 a 40g).

No perfil PA utilizaram-se 24 geofones equiespaçados de 4m, ao longo do alinhamento ilustrado na Figura 1. Foram efectuadas apenas duas activações da fonte sísmica (“tiros”), uma em cada um dos extremos do perfil de geofones, a 2m do geofone extremo, perfazendo um perfil com comprimento total de 96m. Para este perfil obteve-se um modelo interpretativo com três camadas sub-horizontais, cujas distribuições verticais “médias”, tomando os valores médios de V_P e da espessura de cada camada, são representadas nas Figura 2 e Figura 4 (secção 4).

No perfil P5L foram utilizados 41 geofones equiespaçados de 3m, ao longo do alinhamento ilustrado na Figura 1, perfazendo um perfil com 120m de comprimento. A interpretação foi baseada nas duas activações extremas da fonte sísmica (directa e inversa), nas posições 0m e 120m, e permitiu, neste caso, obter um modelo com quatro camadas. Embora a estratificação e

os valores de V_p sejam semelhantes aos obtidos no perfil PA para as primeiras três camadas, foi possível neste perfil P5L, com maior comprimento do que o perfil PA, definir uma aparente terceira interface refractora e, como tal, uma quarta camada subjacente. As distribuições verticais “médias”, tomando os valores médios de V_p e da espessura de cada camada deste perfil, são igualmente representadas nas Figura 2 e Figura 4 (secção 4).

3.2. Método das ondas superficiais (MOS)

O método das ondas superficiais, aqui designado por MOS, que foi igualmente aplicado no Campo Experimental do LNEC, forneceu um modelo da estratificação local mais detalhado (com maior resolução vertical) do que o obtido com o método da refração sísmica, incluindo a respectiva distribuição vertical da velocidade da onda S (V_s).

Centrados no ponto SW5 (ver Figura 1) e segundo o mesmo alinhamento do perfil P5L foram realizados dois perfis colineares de aquisição activa de dados de ondas superficiais (de Rayleigh) usando dispositivos lineares multi-receptores. Em ambos os dispositivos foram usados 24 geofones (frequência própria de 4,5 Hz). Num dos dispositivos os geofones foram equiespaçados de 3m, perfazendo um perfil com 69m de comprimento, e no outro, foram equiespaçados de 1,5m, integrando um perfil com 34,5m de comprimento. Para cada um destes dispositivos, foram activadas fontes sísmicas a várias distâncias dos dois extremos do dispositivo. Foram ainda utilizadas várias fontes sísmicas para cada dispositivo de recepção, nomeadamente, uma marreta de 7,5kg, um deflectómetro de impacto portátil, operado manualmente e correspondendo à queda de um peso de 15kg de uma altura de 80cm, e ainda a detonação de uma pequena carga explosiva (~20 a 40g).

De acordo com os fundamentos do MOS, o modelo resultante da interpretação dos dados corresponde à distribuição vertical e pontual da velocidade da onda S, no ponto central da linha de aquisição de dados, que, naturalmente, no caso ideal teórico do meio de propagação corresponder a uma pilha de camadas horizontais e homogéneas – pressuposto da aplicação do MOS, corresponde à determinação de V_s e da espessura de cada uma dessas camadas.

O processamento dos registos sísmicos adquiridos nos dois dispositivos centrados no ponto SW5, para obtenção das curvas experimentais de dispersão das ondas de Rayleigh em função da frequência, foi realizado no domínio da “frequência – número de onda” (f-k), onde se somaram os espectros f-k individuais de todos os registos efectuados, para cada um dos dispositivos de recepção. As curvas de dispersão correspondentes a cada um destes dispositivos foram então extraídas dos resultantes espectros (f-k) globais ou espectros soma. A modelação destas curvas experimentais, para obtenção da distribuição vertical de V_s no ponto central SW5, foi essencialmente realizada por um processo interactivo (e iterativo) de modelação directa, que permitiu assim incorporar informação *a priori*, como, por exemplo, a informação fornecida pelos perfis de refração sísmica PA e P5L. Estas técnicas de processamento de dados do MOS e de modelação das curvas de dispersão são descritas detalhadamente em Coelho (2009).

A distribuição vertical de V_s (que é o objectivo principal do MOS), mas também as distribuições verticais associadas de V_p e de ν (coeficiente de Poisson), para o modelo ajustado às curvas experimentais no local SW5, são representadas nas Figura 2 a Figura 4 (secção 4).

3.3. Ensaio sísmico entre os furos S1 e S2

Após a execução das sondagens S1 e S2 e dos ensaios mecânicos *in situ*, os furos S1 e S2 foram revestidos com tubo metálico selado na base e solidarizado ao terreno, para permitir a execução de ensaios sísmicos entre furos (do tipo *crosshole seismic test*, ASTM D4428/D4428M, 2007).

Foram realizados ensaios sísmicos entre os furos S1 e S2, entre 1 e 40m de profundidade, com intervalo de 1m entre medições consecutivas. Foi efectuado o levantamento inclinométrico de cada um dos furos, para determinar os seus desvios da vertical, e, conseqüentemente, corrigir a distância entre furos em profundidade. As velocidades V_p e V_s foram pois calculadas com base na distância (entre furos) corrigida para cada nível dos ensaios sísmicos.

Os resultados dos ensaios sísmicos entre os furos S1 e S2 são representados graficamente nas Figura 2 a Figura 4, na secção 4, onde é feita a interpretação conjunta destes resultados com os resultados dos outros métodos aplicados no Campo Experimental do LNEC. Devido à própria natureza dos ensaios sísmicos entre furos, as resultantes distribuições verticais de V_p e de V_s são necessariamente mais precisas e com maior resolução em profundidade, do que as obtidas pelos métodos sísmicos anteriores, servindo, por isso, para aferição e avaliação dos resultados dos métodos aplicados à superfície do terreno.

4. INTERPRETAÇÃO CONJUNTA DOS RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a sùmula dos resultados de todos os métodos sísmicos aplicados no Campo Experimental do LNEC: refração sísmica, MOS e ensaios sísmicos entre os furos S1 e S2 (com referência CH, de *crosshole*, na Figura 2). Antes de mais, verifica-se uma notável concordância entre os resultados dos vários métodos geofísicos, em termos das distribuições verticais, quer de V_s , quer de V_p .

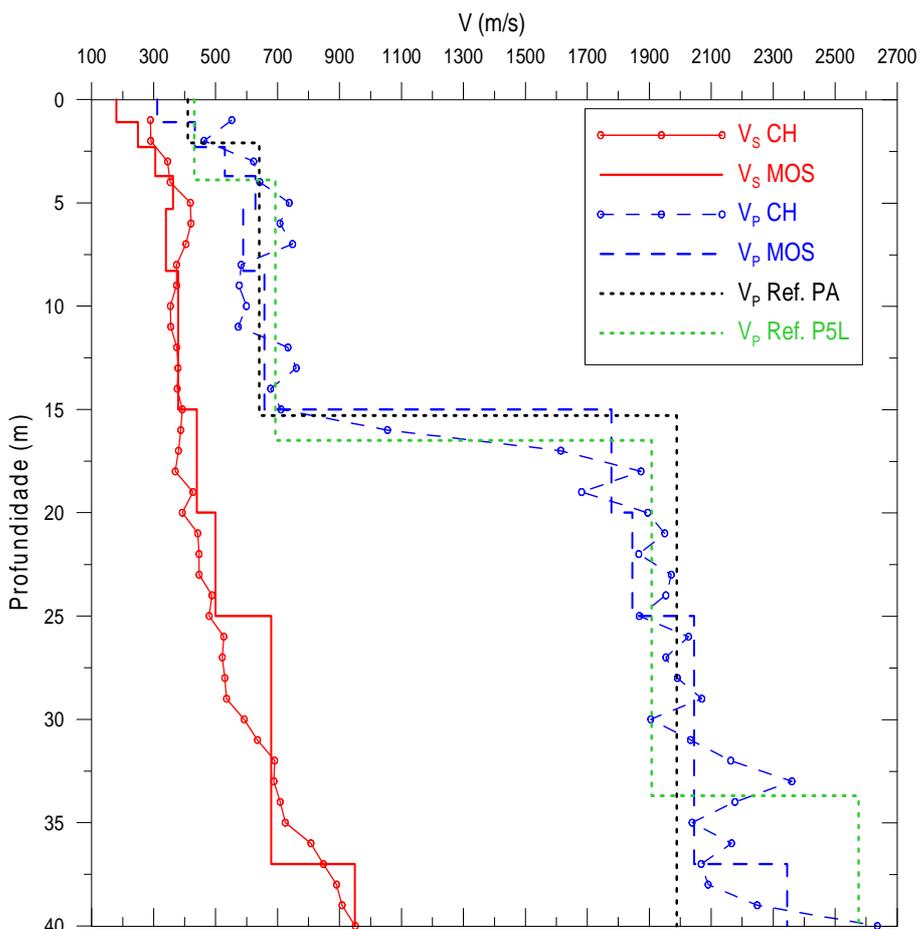


Figura 2 – Comparação de resultados dos métodos sísmicos aplicados no Campo Experimental do LNEC: refração (perfis PA e P5L), MOS e ensaios entre furos (referência CH na legenda gráfica).

Saliente-se que o perfil P5L e os perfis do MOS são colineares e praticamente centrados na secção S1-S2 e no ponto SW5. Apenas o perfil de refração PA, embora paralelo ao alinhamento de P5L, tem o seu ponto central afastado cerca de 14m para sul do ponto SW5 (ver Figura 1).

As distribuições verticais de V_p ilustradas na Figura 2, com “Ref. PA” e “Ref. P5L”, são relativas aos perfis de refração sísmica PA e P5L e foram obtidas tomando os valores médios das velocidades e das espessuras de cada camada, nos respectivos modelos interpretativos.

Cruzando estes resultados com a litologia revelada pelas sondagens S1 e S2, verifica-se que, dando um maior peso aos valores obtidos nos ensaios sísmicos entre furos, o valor típico de V_s nos materiais da formação “Areias de Quinta do Bacalhau” é de cerca de 380m/s, considerando os valores entre 4 e 17m de profundidade, observando-se pequena variação em torno deste valor médio. Na formação “Argilas do Forno do Tijolo” a velocidade da onda S aumenta gradualmente em profundidade entre cerca de 370 e 535m/s até 29m de profundidade. Entre 30 e 35m aumenta mais rapidamente, até atingir cerca de 725m/s aos 35m. A partir dos 36m tem novamente um elevado incremento atingindo cerca de 950m/s aos 40m de profundidade. Este crescimento de V_s revela naturalmente um aumento da rigidez dos materiais desta formação em profundidade.

Relativamente à velocidade da onda P, dando aqui igualmente maior preponderância aos valores obtidos nos ensaios sísmicos entre furos, verifica-se que, na formação “Areias de Quinta do Bacalhau”, acima do nível freático (considerando os valores entre 4 e 15m de profundidade), toma valores entre cerca de 575 e 760m/s, apresentando maiores oscilações do que V_s . Na formação “Argilas de Forno do Tijolo” V_p varia entre cerca 1680 e 2070m/s até aos 31m, e a partir de 32m de profundidade, varia entre cerca 2040 e 2635m/s, o que, apesar de ocorrerem algumas inversões do crescimento, evidencia uma melhoria das características mecânicas a estas profundidades em consonância com a distribuição de V_s .

A comparação dos resultados dos vários métodos sísmicos, ilustrados na Figura 2, comprova a eficácia dos métodos sísmicos aplicados inicialmente à superfície do terreno – refração e MOS – para a prévia caracterização do sítio. De facto, mesmo antes da realização das sondagens mecânicas, estes métodos forneceram modelos geofísicos que se mostraram boas aproximações quer em termos da estratificação local intersectada pelas sondagens, quer em termos da profundidade do nível freático; também as respectivas distribuições verticais de V_s e de V_p , apesar da menor resolução em profundidade inerente a estes métodos, revelaram, de um modo geral, tendências e valores médios, semelhantes às das distribuições obtidas com os ensaios sísmicos entre furos. Além disso, deve ter-se em conta nesta comparação, que os métodos aplicados à superfície reflectem uma “média” das propriedades mecânicas dos solos ao longo da extensão dos perfis de aquisição de dados, da ordem de várias dezenas de metros, enquanto que o ensaio sísmico entre furos reflecte apenas a “média” destas características na secção entre furos, com um extensão de cerca de 5m. A forte correlação entre todos os resultados denota, por isso, uma elevada homogeneidade horizontal das formações geológicas no sítio do Campo Experimental.

Na Figura 3 mostram-se no mesmo gráfico, os valores de $V_{s,lab}$ obtidos nos ensaios de coluna ressonante em três amostras recolhidas no furo S2, os valores de V_s *in situ*, obtidos pelo MOS e pelos ensaios sísmicos entre furos, os valores de N_{SPT} obtidos nos ensaios SPT efectuados ao longo do furo S1, e ainda os valores extrapolados de N_{SPT} , aqui designados por N' .

N' foi calculado tendo em conta a penetração nas 2ª e 3ª fases do ensaio SPT, da seguinte forma, válida apenas nos casos em que houve penetração além da 1ª fase do ensaio (ou seja, nos casos em que, pelo menos, houve penetração na 2ª fase):

$$N' = \frac{(N_{SPT}) \times 30\text{cm}}{(p_{F2} + p_{F3})}, \text{ quando } p_{F1} = 15\text{cm e } p_{F2} > 0\text{cm} \quad [1]$$

onde N_{SPT} é o número total de pancadas medidas na 2ª e 3ª fases do ensaio, até ao máximo de 60 pancadas, e onde p_{F1} a p_{F3} correspondem às penetrações, em cm, obtidas em cada fase do ensaio (F1 – 1ª fase, F2 – 2ª fase e F3 – 3ª fase). Como o ensaio SPT efectuado a 36m de profundidade no furo S1, foi interrompido na 1ª fase ao fim de 60 pancadas, com apenas 11cm de penetração, não foi possível calcular N' para esta profundidade.

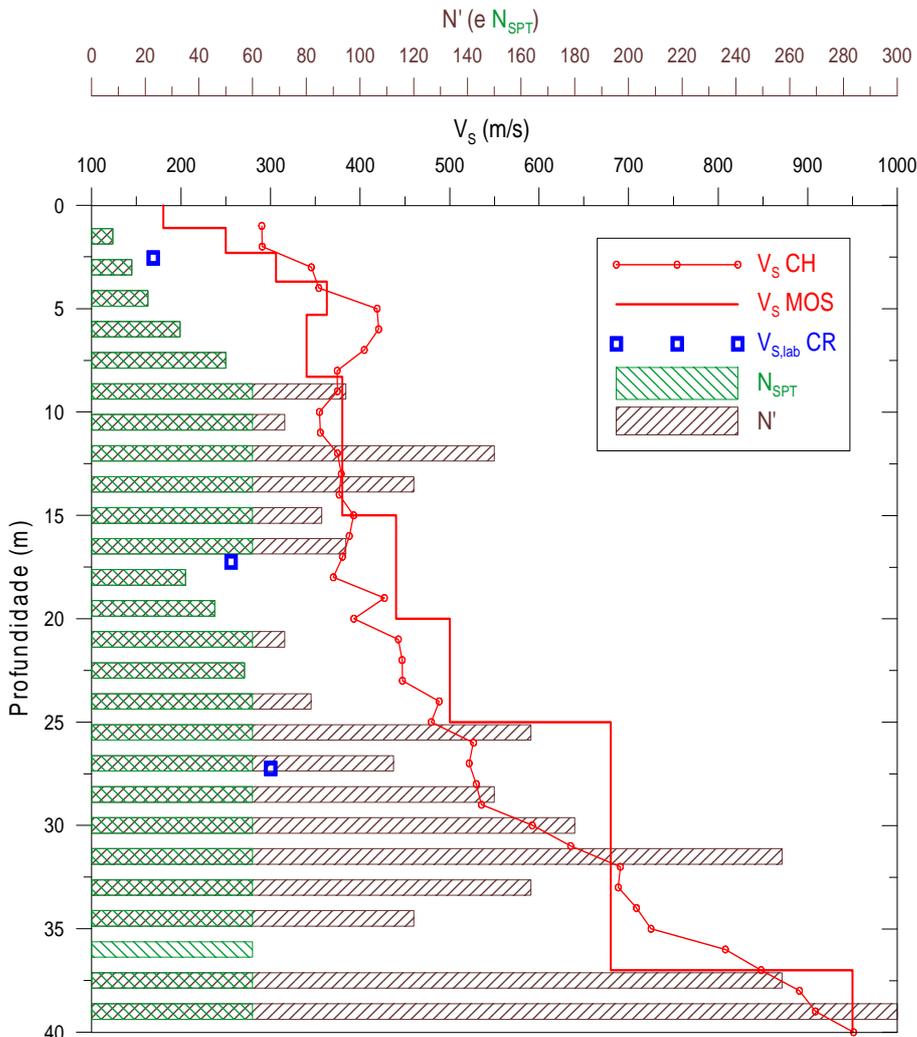


Figura 3 – Campo Experimental do LNEC: comparação dos resultados dos ensaios SPT (N_{SPT} e N'), dos ensaios de coluna ressonante ($V_{S,lab}$ CR), e de V_S *in situ*, obtida pelo MOS (V_S MOS) e pelos ensaios sísmicos entre furos (V_S CH).

Um aspecto importante que sobressai da Figura 3 é precisamente a baixa sensibilidade do parâmetro N_{SPT} (com o valor máximo de 60 pancadas), às variações da rigidez dos materiais, sobretudo para aqueles em que V_S é superior a cerca de 400m/s, revelando ser um parâmetro pouco adequado para a caracterização de terrenos de elevada rigidez. Pelo contrário, o parâmetro extrapolado N' apresenta maior consonância com a variação de V_S , e portanto, da rigidez, em profundidade, indiciando ser um parâmetro com maior sensibilidade para este tipo de formações geológicas.

Observa-se ainda na Figura 3 que os valores de $V_{S,lab}$ são muito inferiores aos valores de V_S *in situ*, da ordem de 0,6 a 0,7 de V_S *in situ*, para as mesmas profundidades, tomando os valores obtidos nos ensaios sísmicos entre furos. Este facto está certamente relacionado com a perturbação e descompressão que as amostras sofrem, mesmo as “indeformadas”. Estes resultados mostram a importância da determinação de V_S *in situ* para a estimativa do valor máximo do módulo de rigidez (G_{max}).

Na Figura 4 destaca-se a comparação dos resultados dos vários métodos sísmicos, em termos das distribuições verticais de V_P e de ν (coeficiente de Poisson). Saliente-se a expressiva conformidade entre as distribuições verticais de V_P e de ν , obtidas com o MOS e com os ensaios sísmicos entre furos, nomeadamente, abaixo de 17m de profundidade.

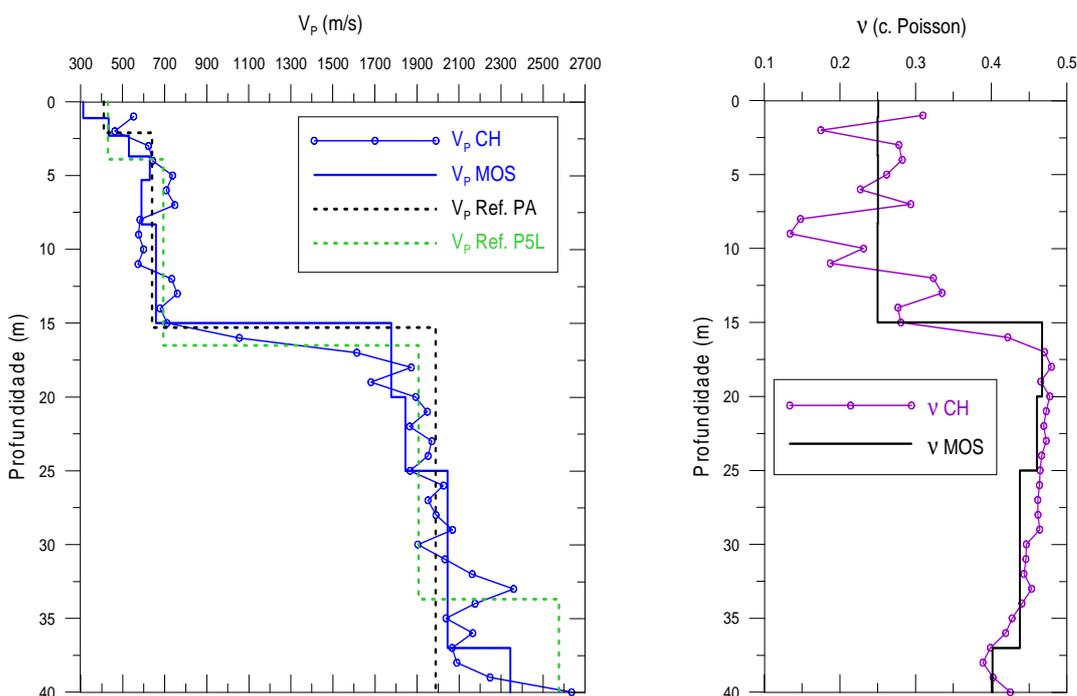


Figura 4 – Campo Experimental do LNEC: comparação dos resultados dos vários métodos sísmicos utilizados, em termos de V_P e de ν .

5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA PRELIMINAR DO SÍTIO DO CAMPO EXPERIMENTAL DO LNEC

Os resultados dos métodos geofísicos, das sondagens e dos ensaios mecânicos *in situ*, e ainda dos ensaios laboratoriais sobre as amostras recolhidas nas sondagens, permitiram efectuar uma caracterização geológico-geotécnica (preliminar) do sítio do Campo Experimental do LNEC, resumida no Quadro 1. Para o cálculo dos módulos dinâmicos de rigidez e de elasticidade, G e E , para cada material considerado no Quadro 1, usaram-se valores médios da massa volúmica, ρ , calculados a partir das massas volúmicas das várias amostras ensaiadas no laboratório.

Como se pode verificar no Quadro 1, consideraram-se duas sub-divisões, quer na formação “Areias de Quinta do Bacalhau”, acima e abaixo do nível freático, quer na formação “Argilas de Forno do Tijolo”, acima e abaixo de 30m de profundidade, dado que apresentam características mecânicas distintas. Destacam-se os elevados valores das velocidades das ondas sísmicas e dos módulos dinâmicos *in situ*, G e E , na formação “Argilas de Forno do Tijolo”, abaixo de 30m de

profundidade, da mesma ordem de grandeza dos medidos em rochas brandas, o que mostra a elevada qualidade mecânica desta formação do Miocénico.

Quadro 1 – Caracterização geotécnica preliminar do sítio do Campo Experimental do LNEC. AQB – “Areias de Quinta do Bacalhau”; AFT – “Argilas de Forno de Tijolo”; NF – nível freático (15,5m).

Prof. (m) e formação	Material	ρ (kg/m ³)	Parâmetros dinâmicos <i>in situ</i>					N_{SPT}	Pressiómetro	
			V_s (m/s)	V_p (m/s)	ν	G (MPa)	E (MPa)		P_1 (MPa)	E_M (MPa)
1,50-3,00 aluvião	areia média a fina, silto-argilosa	2144	290	465	0,17	180	425	8	–	–
4,00-15,50 AQB, acima do NF	areia média a grossa, com passagens siltosas	1611	355 a 420	575 a 760	0,13 a 0,33	200 a 285	485 a 715	15 a >60	2,3 a 6,0	11,9 a 41,4
15,50-17,50 AQB, abaixo do NF	areia média a grossa, com passagens siltosas	2115	380 a 390	1055 a 1615	0,42 a 0,47	305 a 320	900 a 905	>60	–	–
18,00-29,00 AFT	siltes arenosos e argilosos	2129	370 a 535	1680 a 2070	0,46 a 0,48	290 a 610	865 a 1790	35 a >60	4,3 a 5,4	143,1 a 193,4
30,00-40,00 AFT	siltes argilosos, margosos, com passagens calcareónicas	2168	590 a 950	1905 a 2635	0,39 a 0,45	760 a 1960	2200 a 5590	>60	–	–

Para concluir, realce-se que a criação deste Campo Experimental no LNEC se revelou muito útil, não só para a comparação dos diferentes métodos geofísicos e geotécnicos aplicados, como também para os estudos experimentais do MOS. A caracterização geológico-geotécnica efectuada aumenta o potencial do Campo Experimental para futuros trabalhos de investigação, nomeadamente, sobre o estudo e comparação de outros métodos geofísicos e geotécnicos. Estes trabalhos futuros poderão, naturalmente, completar esta caracterização do sítio, aqui iniciada.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao LNEC o empenho e os meios para o estabelecimento deste importante Campo Experimental e para o referido trabalho de investigação desenvolvido pela primeira autora.

Agradece-se à Geocontrole SA o notável contributo para a caracterização geológico-geotécnica do Campo Experimental do LNEC, que incluiu a execução, a título gracioso, das sondagens e dos ensaios mecânicos *in situ*, bem como a colaboração na interpretação dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ASTM D4428/D4428M-07 (2007). *Standard test methods for crosshole seismic testing*. American Society for Testing and Materials Standards, USA, 11p.
- Coelho, M.J. (2009). *Desenvolvimentos do método das ondas superficiais no âmbito da geotecnia*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Ciências de Engenharia pela Universidade Técnica de Lisboa, LNEC/IST, Lisboa. (Documento provisório, não publicado).
- INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (2006). *Notícia explicativa da folha 34-D (Lisboa) da carta geológica de Portugal, escala 1:50000*. INETI, I.P., Lisboa.
- SGP – Serviços Geológicos de Portugal (1986). *Carta geológica do concelho de Lisboa, escala 1:10000*. SGP, Lisboa.