

Ensaio Cross-Hole nas Camadas de Prazeres - Lisboa

Mafalda Lopes Laranjo^{1(*)}, Jorge M. Carvalho², Manuel Matos Fernandes³

¹Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) – Viana do Castelo, Portugal

²Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, DEM/CERENA – Porto, Portugal

³Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia – Porto, Portugal

(*)Email: mlopes@estg.ipvc.pt

RESUMO

As Camadas de Prazeres são uma formação geológica que cobre uma área significativa da zona nobre da cidade de Lisboa. Nas últimas décadas tem-se assistido a um considerável desenvolvimento do tecido urbano, com a construção de edifícios com significativo desenvolvimento em profundidade e altura, a construção de parques de estacionamento subterrâneo, e a expansão do Metropolitano de Lisboa. Estas são obras de cariz fundamentalmente geotécnico, que compreendem as referidas formações geológicas, pelo que a sua caracterização assume particular relevância. Este trabalho apresenta os resultados obtidos numa campanha de ensaios sísmicos entre furos, cross-hole, realizada num campo experimental no centro da cidade, no âmbito de um trabalho mais abrangente de caracterização destes solos, desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Apresenta-se os resultados de duas campanhas de ensaios cross-hole, realizados com diferentes equipamentos, para obter os parâmetros, módulo de distorção máximo, G_0 e o coeficiente de Poisson, ν , das referidas formações.

Palavras-chave: Argilas Miocénicas, cross-hole sísmico, módulo de distorção máximo, muito pequenas deformações.

1. INTRODUÇÃO

As Camadas de Prazeres são uma formação argilosa pertencente à Série Miocénica, presente na Bacia do Baixo Tejo, na margem Oeste da placa Ibérica. Esta bacia formou-se no início do Terciário, quando a região se afundou entre falhas e os detritos coluviais provenientes das zonas periféricas se acumularam. A sua história geológica é bastante complexa e resulta da interação entre diversos eventos tectónicos e de oscilações do nível das águas do mar. O processo de sedimentação que deu origem às formações em estudo é considerado por alguns autores como um fenómeno contínuo que está ainda ativo (Antunes et al., 2000). A Série Miocénica de Lisboa é considerada como um referencial na Europa Ocidental, devido à sua localização geográfica e à presença alternada de níveis continentais e marinhos, que possibilita o estabelecimento de uma rigorosa série de acontecimentos (Almeida, 1991).

A Série Miocénica, que resulta de 16 Milhões de Anos (M.A.) de sedimentação compreende diversas formações, que incluem solos duros a rochas brandas, e apresenta em alguns locais espessuras da ordem dos 300 m. De entre estas formações assumem particular relevância as formações argilosas, nomeadamente as Camadas de Prazeres, que constituem a base da Série e incluem argilitos, argilitos siltosos, argilitos margosos e margas (Zbyszewski, 1947).

Na Carta Geológica de Lisboa (Moitinho de Almeida, 1986) é possível verificar que as Camadas de Prazeres ocupam grande parte do subsolo da cidade, e se desenvolvem em áreas de elevado interesse patrimonial e histórico. A realização de obras de cariz geotécnico nestas áreas requer naturalmente que se conheçam com propriedade as características de resistência e deformabilidade das formações em estudo.

Incluídos num estudo sobre as características geotécnicas das Argilas Miocénicas de Lisboa realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), foram efetuados ensaios num campo experimental e recolhida informação relevante acerca das propriedades destes solos (Lopes Laranjo, 2013).

Em primeiro lugar apresenta-se uma breve descrição das características físicas destes solos e dos trabalhos realizados no campo experimental. Em seguida apresenta-se os resultados dos ensaios sísmicos *cross-hole* (CHT) realizados, usando dois tipos de equipamento diferentes, e são discutidas as principais diferenças entre parâmetros obtidos a partir dos resultados de ambos. Para concluir apresenta-se uma comparação destes resultados com os resultados de outros ensaios realizados no mesmo local, no âmbito do trabalho identificado anteriormente, nomeadamente correlacionados com a informação disponível dos ensaios SPT.

2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

As características físicas das Camadas de Prazeres foram determinadas a partir de uma amostra em bloco cuidadosamente recolhida no campo experimental, tendo os ensaios de identificação sido realizados no Laboratório de Geotecnia da FEUP. As curvas granulométricas obtidas para cinco amostras apresentam-se na Figura 1 e a Tabela 1 resume os principais índices físicos. Os resultados vão de encontro ao que descreve a literatura para estes materiais, indicando tratar-se de argilas siltsas com valores médios de 56% de argila, de 41% de silte e 3%.

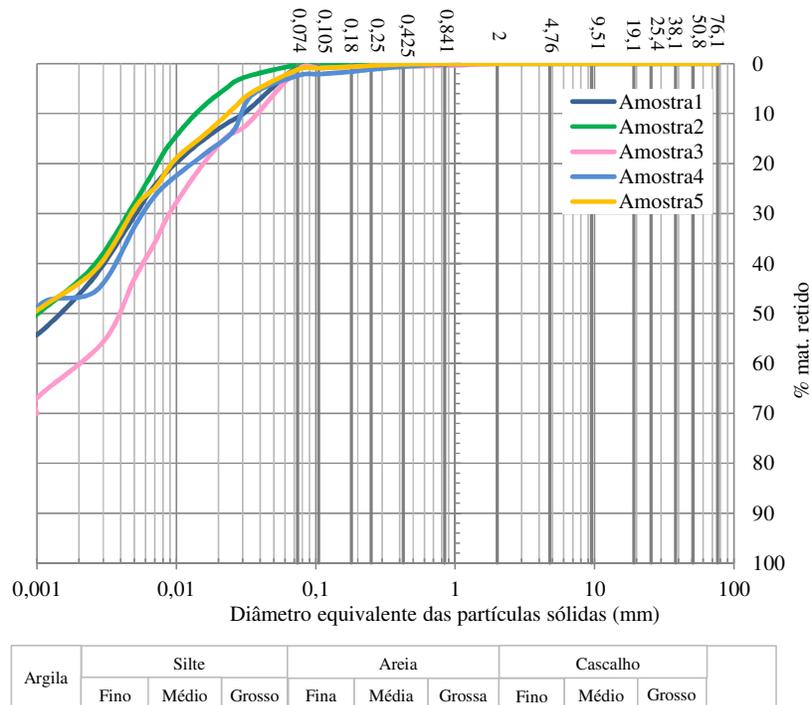


Figura 1 Curvas granulométricas das Camadas de Prazeres.

Tabela 1. Valores médios das propriedades mecânicas.

#	w (%)	w _L (%)	IP (%)	G _s	γ _d (kN/m ³)	γ (kN/m ³)
1	24,1	54	31	2,78	15,2	18,8
2	22,8	51	29	2,79	16,5	20,3
3	17,6	44	23	2,81	15,0	17,7
4	21,7	52	26	2,75	16,0	19,5
5	20,4	48	23	2,77	15,1	18,8

A composição mineralógica das Camadas de Prazeres foi estudada por meio de análises semi-quantitativas por difração de raios-X (Brilha and Sequeira Braga, 1995, Albers et al., 2002, Scapin, 2003) realizadas quer em amostras totais quer apenas na fração fina (dimensão máxima inferior a 2 μm), e complementada por observações no microscópio eletrónico de varrimento (SEM). Os resultados mostram uma significativa percentagem de filossilicatos (mica) e quartzo, e a presença de feldspatos sódicos e potássicos, clorite, pirite e gesso em menores quantidades, como resume a Tabela 2.

Tabela 2. Análises semi-quantitativas por difração de raios –X realizadas em amostras totais e fração fina.

Amostra	Clorite (%)	Albite (%)	Caulinite (%)	Quartzo (%)	Feldspato K (%)	Moscovite (%)	Calcite (%)	Pirite (%)
total	2	23	9	33	-	32	1	-
< 2 μm	3	12	9	40	7	27	-	9

3. ENSAIOS DE CAMPO

3.1 Descrição do campo experimental

O campo experimental escolhido situa-se em Lisboa, na Av. Visconde Valmor n.º 54 - 58, onde será construído um edifício de habitação multifamiliar. O projeto deste edifício inclui três caves e seis pisos elevados, envolvendo uma escavação com 25,0 m de largura por 27,0 m de comprimento e cerca de 10 m de profundidade. A Figura 2 mostra a localização do campo.

A análise de dois relatórios geológico-geotécnicos relativos a obras situadas nos cruzamentos da Av. 5 de Outubro com a Av. Elias Garcia e com a Av. Miguel Bombarda, sugeria que nessa zona a unidade Camadas de Prazeres surgia a uma profundidade relativamente baixa, de cerca de 3,0 m, pelo que o local pareceu bastante favorável tanto à realização de ensaios de campo como à recolha de amostras em bloco para ensaios laboratoriais.

3.2 Programa de ensaios

Os trabalhos de campo compreenderam dois furos de sondagem com cerca de 20 m de profundidade (S1 e S2), tendo sido em S1 realizados ensaios SPT a cada 1,5 m de avanço em profundidade; um furo (S3) onde foram realizados ensaios com o pressiómetro de Ménard (PMT) a 4 profundidades distintas e ainda um outro furo (S4) ao longo do qual se efetuaram ensaios com o pressiómetro autoperfurador (SBPT) a três diferentes profundidades. Para além destes ensaios, foram realizados ensaios sísmicos *cross-hole* (CHT), sobre os quais este trabalho incide. A Figura 3 mostra a vista em planta do campo experimental e a localização dos furos de sondagem descritos.



Figura 2. Localização do Campo Experimental

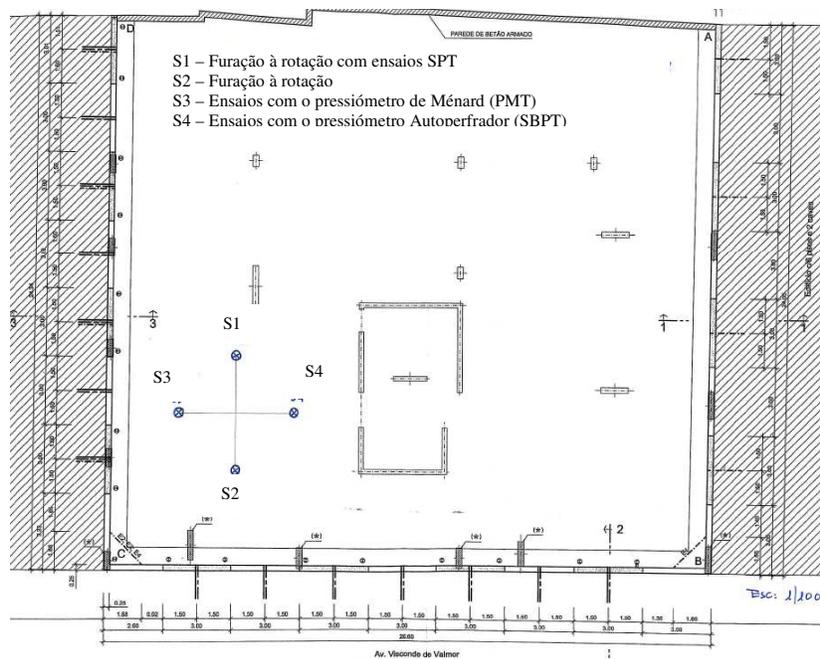


Figura 3. Vista em planta do Campo Experimental com localização dos trabalhos realizados.

A sondagem efetuada no local permitiu identificar a existência de uma camada superficial de aterro com fragmentos de cerâmica e confirmou a presença de formações miocénicas a partir

de 3 m de profundidade. Os solos atravessados são constituídos maioritariamente por argilas e argilas margosas com pequenos núcleos calcários entre 10,5 m e 13,5 m de profundidade, e apresentam cor amarelada à superfície, cinzenta clara entre 6,0 m e 13,5 m e mais escura, com laivos castanhos ou arroxeados a partir de 15,0 m. As camadas atravessadas foram identificadas como pertencentes à unidade geológica das Camadas de Prazeres.

Os ensaios SPT forneceram 60 ou mais golpes a partir de 4,5 m de profundidade e permitiram identificar uma zona mais rija, entre 6,0 m e 12,0 m de profundidade, em que a nega foi obtida logo na primeira fase do ensaio. Os restantes resultados correspondentes a 60 golpes apresentam profundidades de penetração reduzidas.

3.3 Ensaios Cross-Hole

Os ensaios sísmicos foram realizados entre três furos, com uma configuração triangular ilustrada na Figura 4, tendo sido obtidas três secções sísmicas, 3-1, 3-2 e 1-2, respetivamente, com a fonte colocada nos furos 3, 3 e 1 e os recetores nos furos 1, 2 e 2.

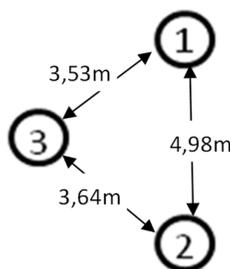


Figura 4. Configuração dos ensaios cross-hole realizados no campo experimental

Os furos de sondagem foram revestidos com tubos de PVC de 87 mm de diâmetro interior obturados na parte inferior e posteriormente selados ao maciço envolvente através da injeção de calda de cimento com areia no espaço anelar entre o tubo e o furo de sondagem. A instalação destes tubos foi feita cuidadosamente, com vista a garantir uma folga entre o tubo de PVC e o furo de sondagem não superior a 10 mm ou 15 mm. Os tubos de PVC utilizados apresentavam uniões do tipo UNI de modo a que nas ligações entre trechos diferentes o diâmetro do tubo não fosse alterado. Nas ligações entre trechos de tubo estes foram colados com um vedante e por cima da união foi colocada fita adesiva de alta resistência, com vista a impedir a entrada de calda de cimento no tubo, diminuindo a profundidade a que os ensaios pudessem ser executados. A Figura 5 mostra algumas imagens da instalação dos tubos.

Os ensaios *cross-hole* foram realizados em duas fases, por duas equipas diferentes e com equipamentos distintos.

Numa primeira fase, foram realizados ensaios entre os furos 3-1 e 3-2, entre as profundidades de 2 m e 18 m, a intervalos de 2 m, tendo-se obtido as respetivas secções de velocidades sísmicas para as ondas P e S. Para o efeito, foi utilizado o seguinte equipamento da FEUP: fonte de tipo *sparker*, com sonda modelo SH-66, da Geotomographie, acionada por um gerador de impulsos elétricos de 5000V, modelo IPG5000, um sistema de receção tri-axial de geofones, orientável, modelo BGK3 da Geotomographie, ligado a uma unidade de controlo remoto, e sismógrafo de 12 canais, modelo S12 SmartSeis, da Geometrics (Viana da Fonseca et al., 2005, Carvalho et al., 2008, Ferreira, 2009, Lopes Laranjo, 2013). Foi necessário encher os tubos de PVC com água, para possibilitar uma melhor transmissão do sinal gerado pelo *sparker*.



Figura 5. Montagem dos tubos de PVC para ensaios sísmicos no campo experimental: a) aspeto geral da furação; b) colocação da calda de cimento; c) tubos com ligações UNI; d) base do tubo obturada; e) colocação de cola nas uniões entre trechos; f) proteção das uniões com fita adesiva de alta resistência.

A sonda *sparker* desce no furo de sondagem montada num suporte que inclui uma bússola para controlar a orientação do impacto e possui uma membrana insuflável que permite fixá-la à parede do tubo de revestimento do furo, à profundidade desejada. O sistema tri-axial de geofones também possui uma membrana insuflável para poder ser fixado no outro tubo à mesma profundidade da sonda *sparker*. Este sistema tem os seus três geofones componentes orientados em três direções ortogonais (X, Y e Z) enviando os sinais gerados para o sismógrafo, ao qual está ligado, de forma a poderem ser visualizados e armazenados. Nestes ensaios, o geofone vertical (Z) ficou ligado ao canal 1, o geofone horizontal alinhado perpendicularmente à direção entre furos (X) ficou ligado ao canal 2 e o geofone horizontal alinhado na direção entre furos (Y) ficou ligado ao canal 3.

O geofone vertical (Z) registará preferencialmente ondas de corte S, polarizadas verticalmente, SV, o geofone horizontal (X) ondas S polarizadas horizontalmente, SH, e o geofone horizontal

(Y), ondas de compressão, P. Com este propósito, a direção de atuação da sonda *sparker*, especialmente adequado para geração de ondas S polarizadas horizontalmente, SH, deverá ser perpendicular à direção entre furos. A cada profundidade ensaiada são feitos dois disparos com orientações desfasadas de 180°, com vista a inverter a polaridade das ondas S, o que facilita a identificação do seu tempo de chegada. O disparo do impulso é feito desde a superfície, através da referida unidade de controlo. Verificou-se ser possível detetar, por vezes muito claramente, a chegada de ondas P. A Figura 6 mostra algumas fotografias do ensaio.



Figura 6. Alguns aspetos da execução dos ensaios CH, com *sparker*, no campo experimental: a) gerador de impulsos e unidade de controlo; b) sismógrafo; c) calha com bússola para *sparker* nas ondas S; d) sistema de aquisição tri-axial; e) sonda *sparker*; f) aspeto geral da sonda *sparker* instalado no furo.

Numa fase posterior, e com o objetivo de estudar a eventual anisotropia no maciço, foi realizado outro conjunto de ensaios *cross-hole*, utilizando como fonte sísmica um martelo gravítico bi-direcional de impacto vertical, como mostra a Figura 7. Esta fonte é especialmente concebida para a geração de ondas S polarizadas verticalmente, SV. Nesta campanha os ensaios foram realizados entre os furos 3-1, 3-2 e 2-1, entre as profundidades de 2 m e 16 m, a intervalos de 1 m, tendo sido obtidas os respetivos perfis de velocidades sísmicas para ondas P e S. Para o efeito, foi utilizado o seguinte equipamento da FEUP: fonte de tipo martelo gravítico bi-

direcional, da GISCO, um sistema de receção tri-axial de geofones, orientável, modelo BHG-3 da Geostuff e sismógrafo de 12 canais, modelo S12 SmartSeis, da Geometrics.



a)



b)



c)



d)

Figura 7. Alguns aspetos da execução dos ensaios CH, com o martelo gravítico, no campo experimental: a) sistema de aquisição tri-axial; b) introdução no furo do sistema de geofones; c) martelo gravítico e bomba de ar; d) Aspeto geral do ensaio.

Previamente à realização dos ensaios foi necessário retirar a água do interior dos furos com o auxílio de uma bomba submersível. Com este equipamento, tanto o martelo como o sistema de aquisição são fixados desde a superfície ao interior dos tubos de revestimento respetivos e à profundidade desejada, através de mecanismos de fixação compostos por uma câmara-de-ar

insuflável, no caso do martelo e por uma mola metálica acionada por um sistema mecânico, no caso do sistema de aquisição. A fixação do martelo é realizada com o auxílio de uma bomba de ar manual, que também se mostra na Figura 7.

O sistema de aquisição possui uma bússola, devendo ser configurado antes do início do ensaio em função da orientação dos furos onde serão instalados o emissor e o recetor. A cada nível de profundidade de fixação, o sistema de geofones é orientado de forma mecânica, desde a superfície.

O martelo é acionado manualmente desde a superfície, com movimento vertical descendente ou ascendente, de modo a ser possível obter ondas SV com polaridades opostas, de forma a facilitar a posterior deteção do respetivo tempo de chegada.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS CROSS-HOLE

4.1 Ensaio com fonte tipo *sparker*

A Figura 8a mostra os perfis de velocidade de propagação das ondas P, V_p , nos ensaios sísmicos realizados. À profundidade de 2,0 m não foi possível identificar o respetivo tempo de chegada. Como se pode observar, a velocidade das ondas ao longo do perfil varia entre cerca de 1500 m/s e 2500 m/s. O valor de 1500 m/s, obtido a 4 m de profundidade está, muito provavelmente, relacionado com a localização do nível freático. O aumento de velocidade, a 6 m de profundidade, corresponde à zona onde também aumenta o número de golpes do SPT, ao passar da zona de argila cinzenta esverdeada para a argila margosa com negra na primeira fase do ensaio e apenas 9 cm de penetração. A velocidade diminui aos 8 m, para depois voltar aos valores próximos de 2500 m/s e voltar a diminuir a partir dos 14 m.

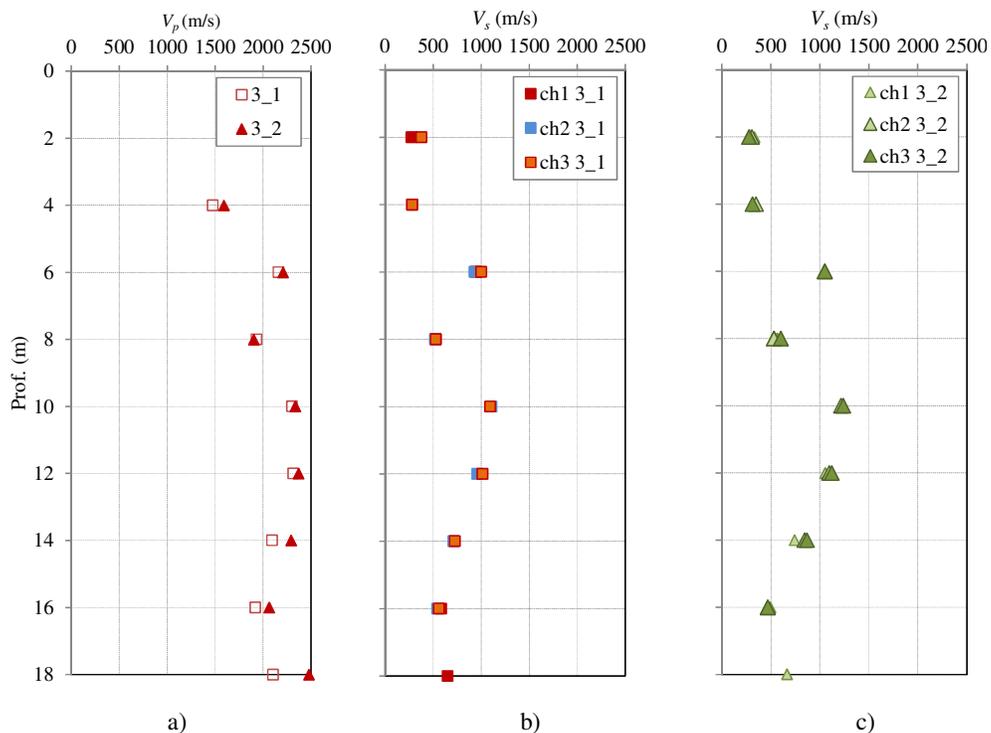


Figura 8. Velocidade de propagação das ondas sísmicas, nos ensaios realizados no campo experimental, entre os furos 3 e 1 (3_1) e 3 e 2 (3_2) usando a fonte tipo *sparker*: a) ondas P; b) ondas S nos três canais (3_1); c) ondas S nos três canais (3_2)

As Figura 8b e Figura 8c mostram a variação da velocidade de propagação das ondas S medida nos três canais, nas duas secções realizadas com a fonte tipo *sparker*. As velocidades das ondas S e P são muito semelhantes nos três canais, tendo ambos os tipos de onda uma evolução em profundidade também muito semelhante. Na Figura 9 mostra-se, para cada canal receptor, a variação da velocidade das ondas medidas nos dois ensaios.

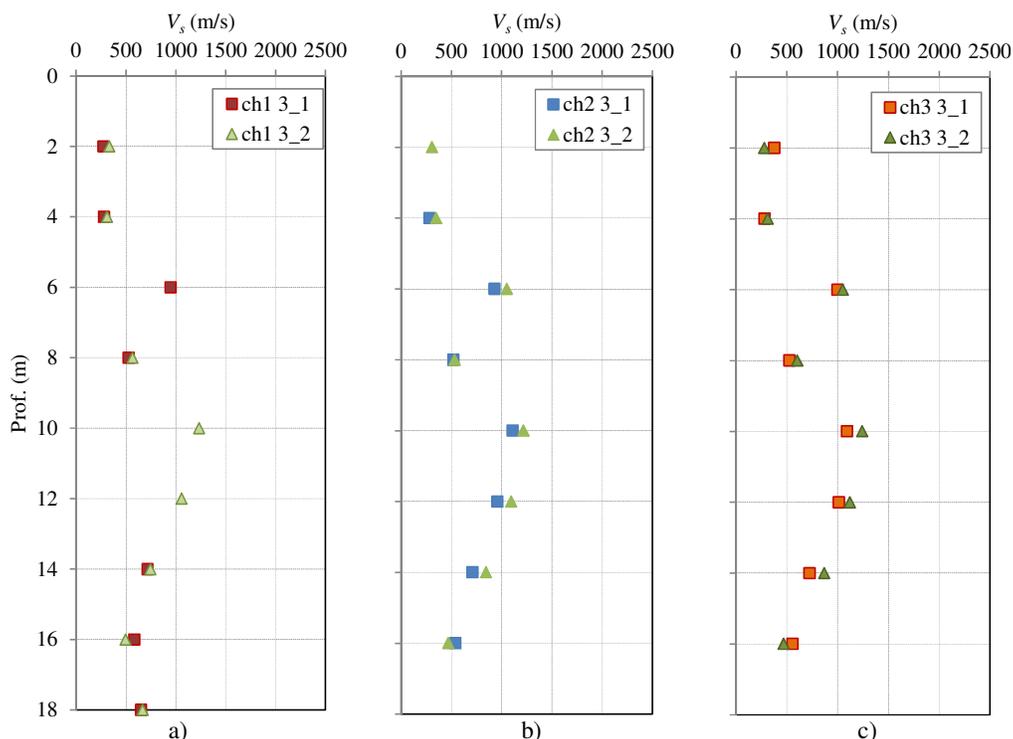


Figura 9. Velocidades de propagação das ondas S medidas no campo experimental nos canais 1, 2 e 3 nos dois ensaios, usando a fonte tipo *sparker*: a) canal 1; b) canal 2; c) canal 3

Em relação à primeira campanha de ensaios usando a fonte tipo *sparker*, as velocidades de propagação das ondas S medidas nos três canais do sistema tri-axial foram bastante semelhantes, não tendo sido possível detetar qualquer efeito da eventual anisotropia do material. Uma vez que a onda foi emitida com polarização horizontal e supostamente com orientação perpendicular à direção entre furos, seria expectável que a amplitude do sinal recebido fosse maior no canal 2 (horizontal e perpendicular à direção entre furos) do que nos outros, mas tal não se verificou. Esta situação pode dever-se a imprecisões aquando da orientação quer do sistema tri-axial quer da sonda *sparker* às diversas profundidades ou ao facto de o impacto do gerador possuir elevada energia para uma distância entre furos relativamente pequena.

Dado que os níveis de deformação associados aos ensaios sísmicos são muito pequenos, é aceitável considerar que o solo tem comportamento linear elástico, pelo que a velocidade de propagação das ondas S pode ser relacionada com o módulo de distorção máximo, G_0 , de acordo com a equação 1:

$$G_0 = \rho \cdot V_S^2 = \frac{\gamma}{g} \cdot V_S^2 \quad (1)$$

O coeficiente de Poisson, (v_{din}), pode ser aferido pela seguinte relação entre as velocidades de propagação das ondas P e S, equação 2:

$$\vartheta = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (2)$$

A Figura 10 mostra a evolução em profundidade do coeficiente de Poisson (v_{din}) e do módulo de distorção máximo (G_0) obtidos com a fonte tipo *sparker*:

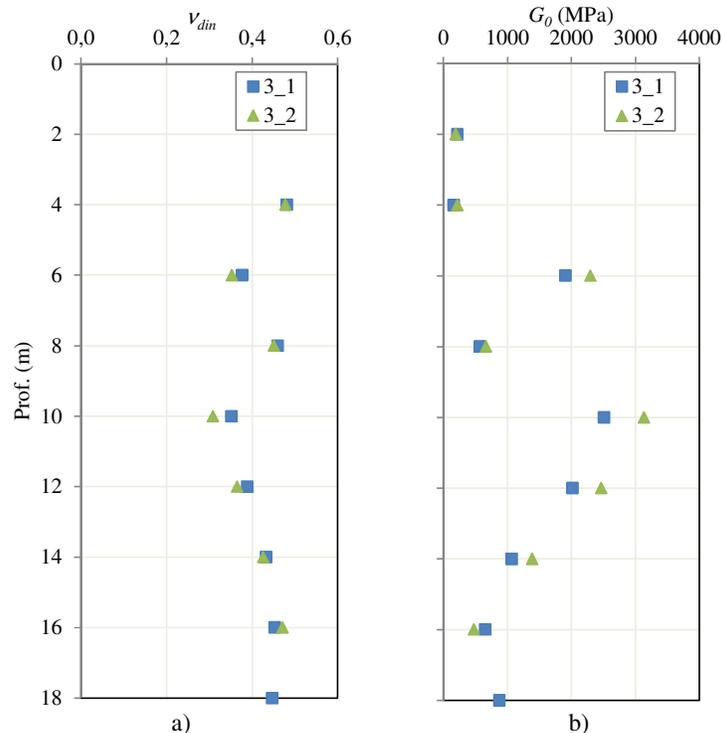


Figura 10. Coeficiente de Poisson (v_{din}), e módulo de distorção máximo (G_0), obtidos nos ensaios sísmicos entre furos realizados no campo experimental usando a fonte tipo *sparker*.

4.2 Ensaios com o martelo gravítico

Na segunda campanha, utilizando o martelo gravítico, os ensaios foram realizados a intervalos de 1,0 m, colocando o emissor no furo 3 e o recetor nos furos 1 e 2 e ainda com o emissor no furo 1 e o recetor no furo 2, de modo a fechar um polígono. Os resultados obtidos para a velocidade de propagação das ondas P mostram bastante coerência entre os três pares de furos, como pode observar-se na Figura 11. A velocidade de 1500 m/s aos 4,0 m de profundidade coincide de novo com a posição estimada para o nível freático, e a comparação desta com a Figura 8a permite verificar que os dois equipamentos forneceram velocidades de propagação semelhantes, embora com algumas discrepâncias pontuais.

A Figura 12 mostra os perfis de velocidades V_s obtidos nos três pares de furos e medidos nos três canais. Tal como com os resultados dos ensaios com o *sparker*, não se encontram diferenças significativas entre as velocidades medidas nos diferentes canais.

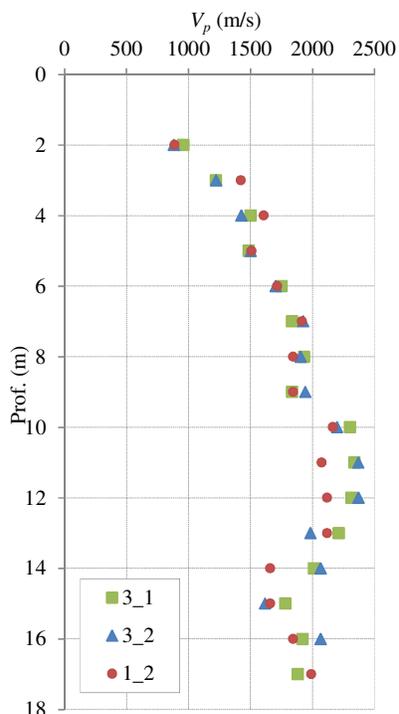


Figura 11. Velocidades de propagação das ondas P nos ensaios realizados no campo experimental entre os furos 3 e 1 (3_1), 3 e 2 (3_2) e 1 e 2 (1_2) usando o martelo gravítico.

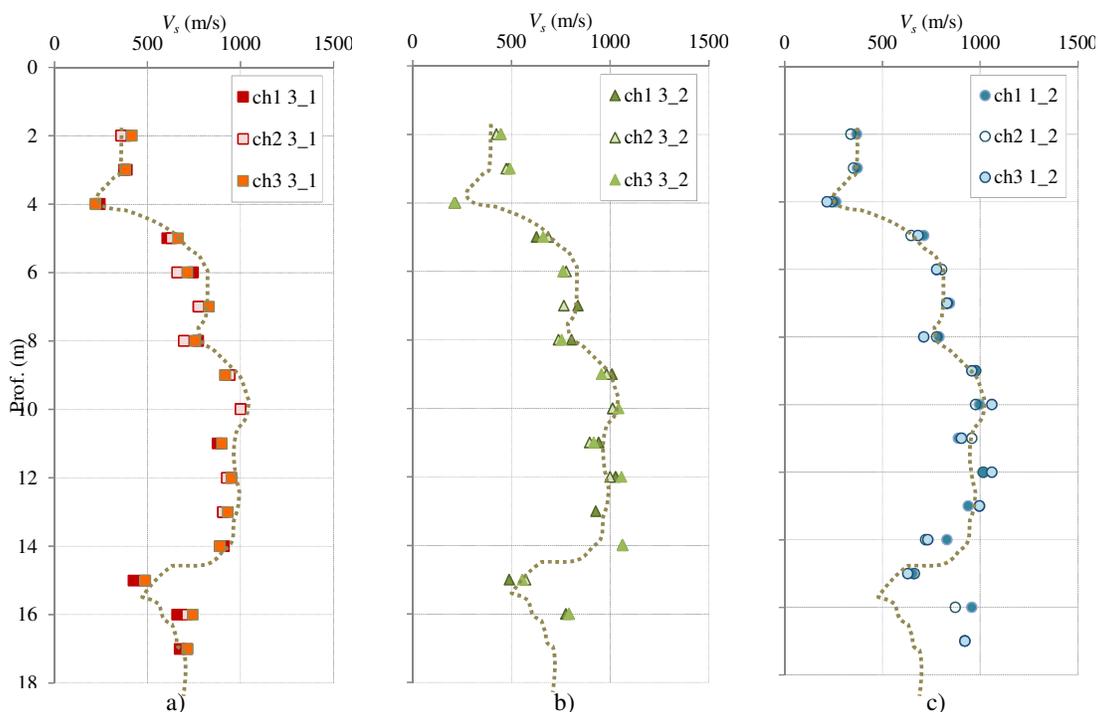


Figura 12. Velocidades de propagação das ondas S medidas nos três canais nos ensaios realizados no campo experimental, usando o martelo gravítico: a) entre os furos 3 e 1; b) entre os furos 3 e 2; c) entre os furos 1 e 2.

Outro aspeto que merece atenção é o facto de os perfis de velocidade serem bastante semelhantes para os três pares de furos, como procuram ilustrar as linhas a tracejado

sobrepostas aos gráficos. A velocidade de propagação das ondas S mostra uma diminuição a 4,0 m de profundidade, coincidente com a localização do nível freático, e em seguida tende a aumentar ligeiramente com a profundidade, diminuindo para profundidades próximas de 15,0 m.

Uma vez mais, a concordância entre os valores medidos nos três canais para cada par de furos é notória. Esta homogeneidade de resultados permite definir um perfil médio representativo de v_{din} e G_{din} para cada canal, calculado com base na média dos tempos de chegada das ondas S e na média das distâncias entre o emissor e o recetor, que se mostra na Figura 15.

O coeficiente de Poisson dinâmico e o módulo de distorção máximo, medidos nos três canais para os três pares de furos, apresentam-se respetivamente na Figura 13 e Figura 14.

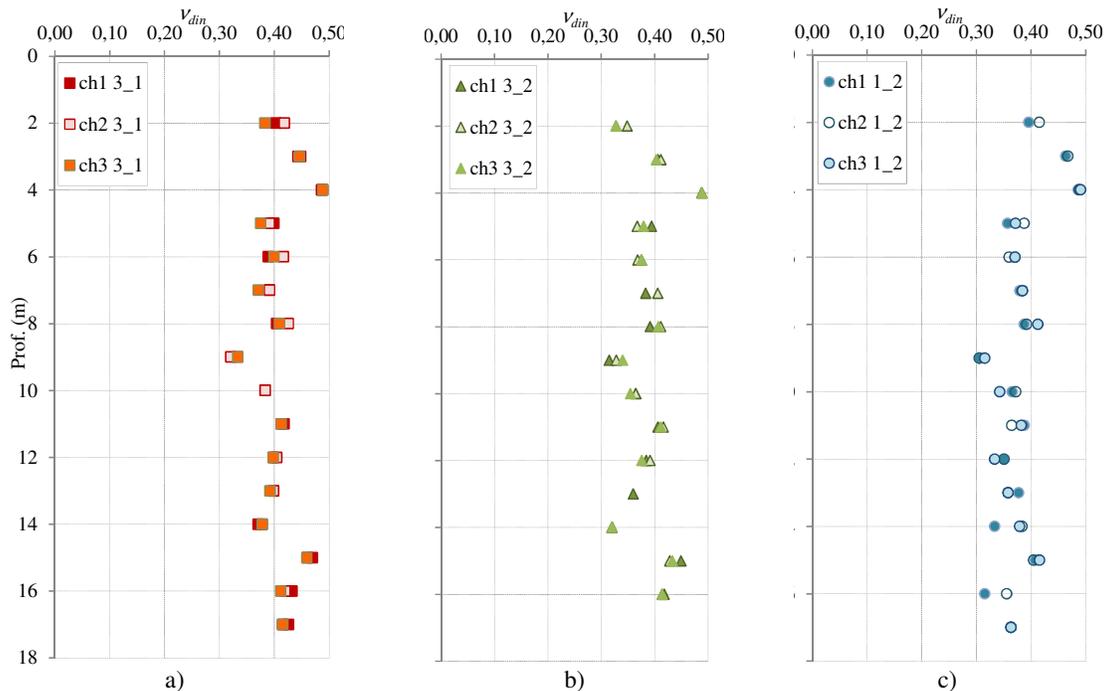


Figura 13. Coeficiente de Poisson dinâmico medido nos três canais nos ensaios realizados no campo experimental usando o martelo gravítico: a) entre os furos 3 e 1; b) entre os furos 3 e 2; c) entre os furos 1 e 2.

O coeficiente de Poisson a 4,0 m de profundidade é igual a 0,5, o que confirma a posição do nível freático e para maiores profundidades não varia significativamente. O módulo de distorção máximo é mais baixo nas camadas mais superficiais e aumenta substancialmente entre 9,0 m e 13,0 m de profundidade, onde o log da sondagem identificou a presença de argila margosa cinzenta clara e o ensaio SPT forneceu nega na 1ª fase, com baixa profundidade de penetração.

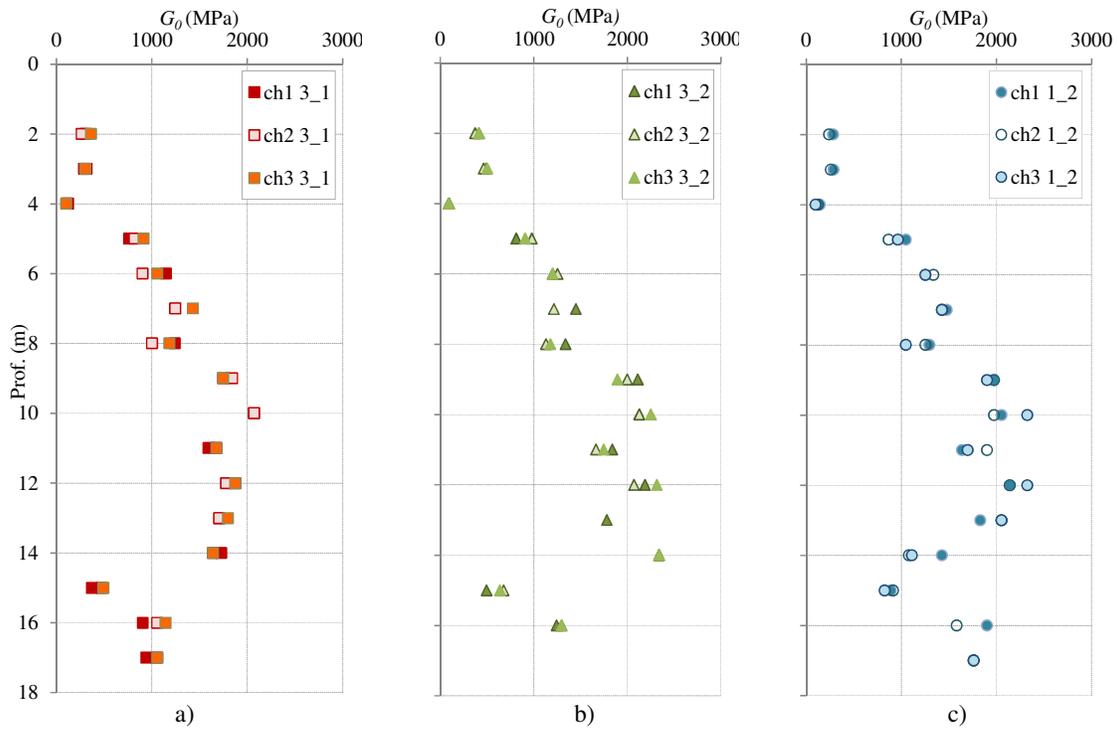


Figura 14. Módulo de distorção máximo medido nos três canais nos ensaios realizados no campo experimental usando o martelo gravítico: a) entre os furos 3 e 1; b) entre os furos 3 e 2; c) entre os furos 1 e 2.

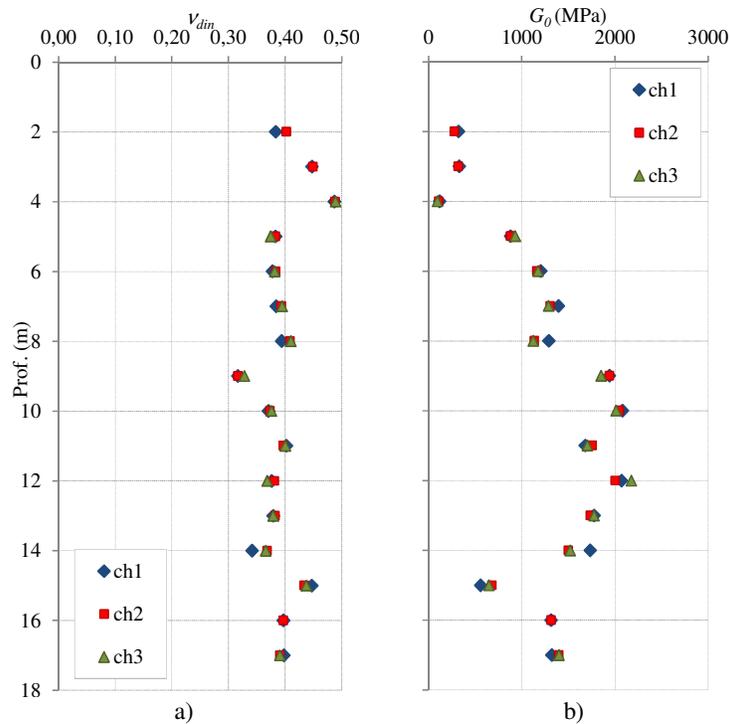


Figura 15. Valores calculados com base na média dos tempos de chegada das ondas S e das distâncias percorridas pelas ondas nos três pares de furos nos ensaios realizados no campo experimental, usando o martelo gravítico: a) coeficiente de Poisson dinâmico; b) módulo de distorção máximo.

5. CONCLUSÕES

A comparação dos resultados obtidos com a fonte tipo *sparker* e com o martelo gravítico mostra-se na Figura 16, que apresenta as velocidades de propagação das ondas P e das ondas S obtidas nas duas campanhas de ensaios. De uma maneira geral os resultados são muito semelhantes, embora com algumas discrepâncias pontuais, o que aponta para que a energia do impacto influencie a amplitude e conteúdo em frequências das ondas mas não altere os tempos de chegada. Com os dois tipos de fonte, tanto para as ondas P como para as ondas S, os resultados são genericamente coincidentes, nas várias profundidades.

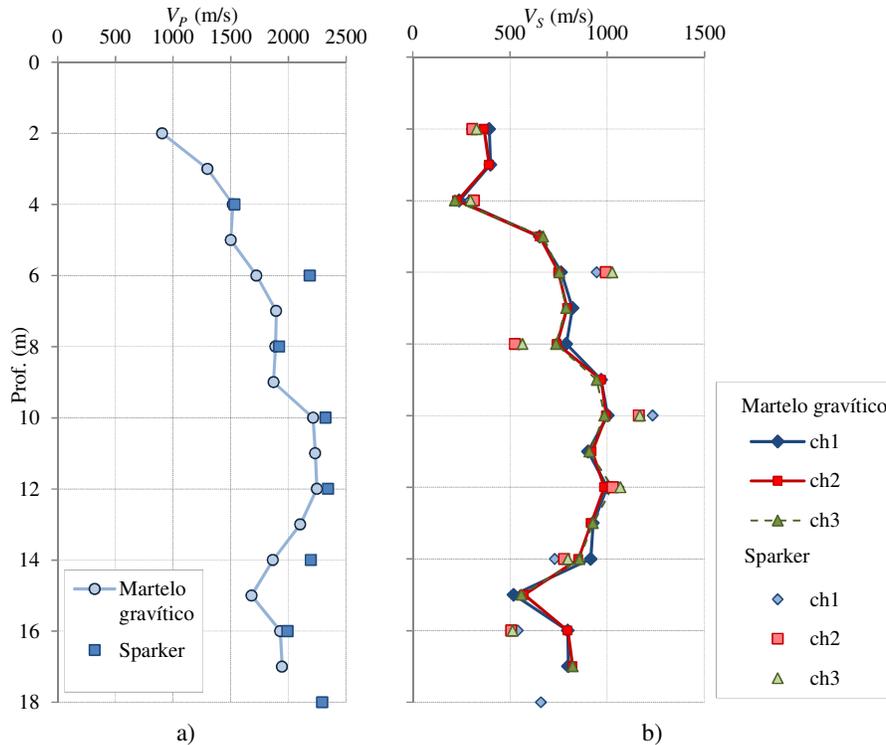


Figura 16. Resultados dos ensaios *cross-hole* realizados no campo experimental com a fonte tipo *sparker* e com o martelo gravítico: a) velocidade de propagação das ondas P; b) velocidade de propagação das ondas S, medidas nos três canais.

Na Figura 17 mostra-se os resultados do ensaio SPT e o módulo de distorção máximo, o qual, dependendo diretamente da velocidade das ondas S, é também bastante coerente para as duas campanhas de ensaio. Pode verificar-se que a tendência para a evolução em profundidade do resultado do SPT é semelhante à que se obteve para G_0 , como procura ilustrar a linha a tracejado sobre a Figura 17. Uma vez que as profundidades de um e outro ensaio nem sempre coincidiam, determinaram-se em primeiro lugar os valores de G_0 que melhor aproximassem as profundidades em questão, utilizando valores médios quando necessário.

Os valores de G_0 obtidos neste campo experimental variam num intervalo próximo do que era esperado para estas formações (Lopes Laranjo et al., 2015a, Lopes Laranjo et al., 2015b), entre 400 MPa e 1500 MPa. Apenas entre 10,0 m e 14,0 m de profundidade foram encontrados valores de G_0 acima de 1500 MPa.

Não foi possível identificar anisotropia destas formações através dos ensaios CHT, e os resultados dos ensaios sísmicos com o emprego de diferentes fontes emissoras foram muito

consistentes, o que sugere que a energia e a frequência central da fonte sísmica tem uma influência significativa na amplitude das ondas sísmicas, mas parece não alterar significativamente os seus tempos de chegada.

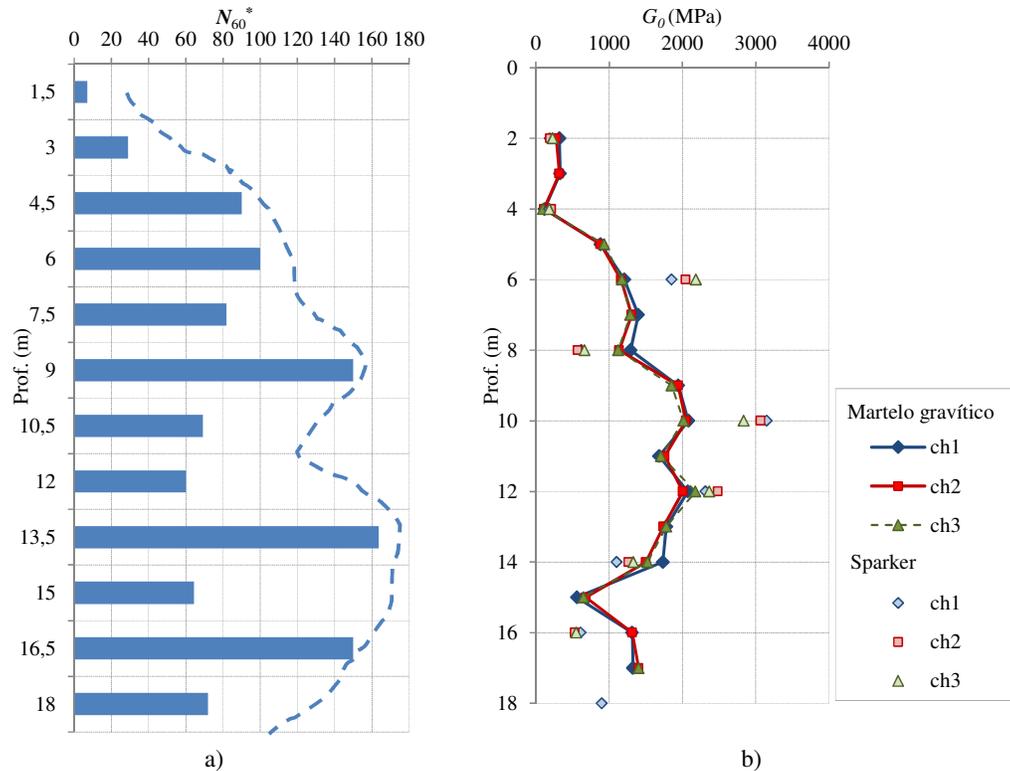


Figura 17. Campo experimental: a) resultados do ensaio SPT extrapolados para atender à profundidade de penetração; b) módulo de distorção máximo obtido nas duas campanhas de ensaios realizadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto PTDC/ECM/64167/2006. As análises mineralógicas foram realizadas na Unidade de Desenvolvimento e Inovação de Materiais do Instituto Politécnico de Viana do Castelo. Os autores desejam exprimir o seu agradecimento ao Laboratório de Geotecnia da FEUP.

REFERÊNCIAS

- Albers, A. P. F., F. G. Melchiades, R. Machado, J. B. Baldo and A. O. Boschi (2002). "Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X." *Cerâmica* 48(305): 34-37.
- Almeida, I. M. (1991). Características geotécnicas dos solos de Lisboa. *PHD*, Universidade de Lisboa.
- Antunes, M. T., P. Legoinha, P. P. Cunha and J. Pais (2000). "High resolution stratigraphy and miocene facies correlation in Lisbon and Setúbal Peninsula (Lower Tagus basin, Portugal)." *Ciências da Terra (UNL)* 14: 183-190.
- Brilha, J. B. and M. A. Sequeira Braga (1995). A decomposição de espectros de difração de raios X no estudo de minerais de argila - um exemplo do Complexo Vulcânico de Lisboa. *Proc. of IV Congresso Nacional de Geologia, Porto*, 4 613-617.

- Carvalho, J. M., A. Viana da Fonseca and F. Almeida (2008). Seismic cross-hole tomography in modeling ISC'2 experimental site. 3rd International Conference on Site Characterization, ISC-3. H. Mayne. Taipei, Taiwan, 2008 Taylor & Francis Group: 799-805.
- Ferreira, C. (2009). The Use of Seismic Wave Velocities in the Measurement of Stiffness of a Residual Soil. *PhD*, FEUP.
- Lopes Laranjo, M. (2013). Argilas Miocénicas de Lisboa. Parametrização para o Dimensionamento de Estruturas Geotécnicas. *PhD*, Porto.
- Lopes Laranjo, M., J. Carvalho, M. Matos Fernandes and A. Viana da Fonseca (2015a). Very small strain stiffness of Lisbon Miocene clayey formation from in situ tests. Proc. of XVI European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Edimburgh, 6 2975-2980.
- Lopes Laranjo, M., M. Matos Fernandes and A. Viana da Fonseca (2015b). Selfboring and Ménards Pressuremeter Tests in Lisbon Miocene Prazeres Clay. Proc. of Symposium International ISP7/PRESSIO 2015, Hammamet, Tunisie 165-172.
- Moitinho de Almeida, F. (1986). Carta Geológica do Concelho de Lisboa. S. G. d. Portugal, Serviços Geológicos de Portugal.
- Scapin, M. A. (2003). Aplicação da difração e fluorescência de raios-X (WDXRF): ensaios de argilominerais. *MsC MsC*, Universidade de São Paulo.
- Viana da Fonseca, A., C. Ferreira and J. Carvalho (2005). "The use of shear wave velocities determined in Down-Hole (V_s^{vh}) and Cross-Hole (V_s^{hv}) tests for the evaluation of K_0 in Soils." *Solos e Rochas* 28(3): 271-281.
- Zbyszewski, G. (1947). "Panorama sur la Geologie de la Ville de Lisbonne." *Boletim da Sociedade de Geografia de Lisboa* 65 Série(9-10).