

# COMBINAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS E MECÂNICOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE SOLO RESIDUAL DO ISC2 NA FEUP

Combining geophysical and mechanical testing techniques for the characterization of FEUP/ISC2 residual soil profile

António Viana da Fonseca\*

Jorge M. Carvalho\*\*

Cristiana Ferreira\*\*\*

Jaime A. Santos\*\*\*\*

Fernando Almeida\*\*\*\*\*

**RESUMO** – Este artigo apresenta um resumo dos trabalhos realizados e os resultados obtidos, numa extensa campanha de caracterização dum maciço predominantemente de solo residual granítico (saprolítico), localizado nos terrenos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (CEFEUP), no âmbito do ISC'2. Este projecto teve como finalidade a caracterização destes solos pouco comuns, no contexto dum programa internacional de previsão do comportamento de diferentes tipos de estacas (classe A). Foram utilizados, na referida campanha, vários ensaios mecânicos, nomeadamente, SPT, CPT, DMT e diferentes métodos geofísicos de superfície e em furos de sondagem, designadamente, sísmica de refração, reflexão, cross-hole (CH) e down-hole (DH), de ondas S e P; resistividade eléctrica; radar de solos (GPR), etc. O maciço é geologicamente formado por uma camada superficial de solo residual granítico heterogéneo, sobrejacente a um substrato granítico muito alterado em contacto com um migmatito gnaissico. Resultados directos e indirectos de alguns dos métodos e ensaios utilizados são comparados entre si e com a informação geológica e geotécnica disponível sobre o local, nomeadamente os resultantes de perfis sísmicos, eléctricos e electromagnéticos realizados na proximidade de três furos de sondagem, nos quais foram recolhidas amostras indeformadas, previamente à realização de ensaios sísmicos CH e DH. Foi também realizado um extenso programa de ensaios laboratoriais com as amostras indeformadas recolhidas. Neste trabalho discutem-se os resultados, com ênfase para as correlações encontradas, específicas de solos saprolíticos com estrutura relicar frágil, conducente a um modelo geológico-geotécnico do local estudado.

**SYNOPSIS** – This paper summarizes the results of an experimental site investigation and characterization survey, on a residual (saprolitic) soil from granite, located at the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP). This project aims at characterizing these unusual soils in the context of the development of an International Prediction Event (Class A) on the behaviour of different types of piles. A very extensive site characterization campaign, including a large variety of in situ tests and field methods, has been held. These investigations comprised the application of several geophysical borehole and surface methods, namely: P and S-wave seismic refraction, reflection, cross-hole (CH), down-hole (DH), electrical resistivity imaging, ground probing radar (GPR), etc. - as well as mechanical tests - namely: SPT, CPT, DMT, among others. The site is geologically formed by an upper layer of heterogeneous residual granitic soil overlaying a weathered granite contacting a gneissic migmatite. Direct and indirect results from some of the surveys are compared between

---

\* Prof. Associado do Dep. Eng. Civil da Fac. Eng. da Univ. Porto (FEUP). E-mail: viana@fe.up.pt

\*\* Prof. Auxiliar do Dep. Eng. de Minas da FEUP. E-mail: jorcarv@fe.up.pt

\*\*\* Mestre em Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica, Doutoranda da FEUP. E-mail: cristiana@fe.up.pt

\*\*\*\* Prof. Auxiliar do DEC do IST-UTL. E-mail: jaime@civil.ist.utl.pt

\*\*\*\*\* Prof. Auxiliar do Dep. Geociências, Univ. Aveiro. E-mail: falm@geo.ua.pt

them and with the available geological and geotechnical information, namely the obtained from seismic, electrical and GPR profiles, conducted adjacent to three boreholes in which undisturbed soil samples were collected previously to geophysical data acquisition. In addition, an extensive laboratory testing program was carried out using the collected undisturbed samples. A discussion of the results is herein presented, with emphasis to correlations encountered between different tests, specific of saprolitic soils with weak relic structures.

**PALAVRA CHAVE** – Ensaios in situ, geofísica, solos residuais.

## 1 – INTRODUÇÃO

Os solos residuais graníticos são muito comuns na zona Noroeste de Portugal, onde se localiza, nos terrenos da FEUP, o campo experimental estudado. O maciço é geologicamente formado por uma camada superficial de solo residual granítico heterogéneo, de espessura variável, sobreposta a um substrato granítico mais ou menos alterado, em contacto com rochas metamórficas de alto grau. A espessura destes horizontes saprolíticos pode chegar a cerca de 20m. Embora apresentem muitas vezes grande heterogeneidade, observa-se frequentemente, em média, uma gradual alteração de características com a profundidade, nomeadamente no que respeita às suas propriedades mecânicas. No entanto, o rigoroso mapeamento da variabilidade espacial das suas propriedades mecânicas, necessárias para uma boa caracterização geotécnica, é frequentemente um desafio exigente.

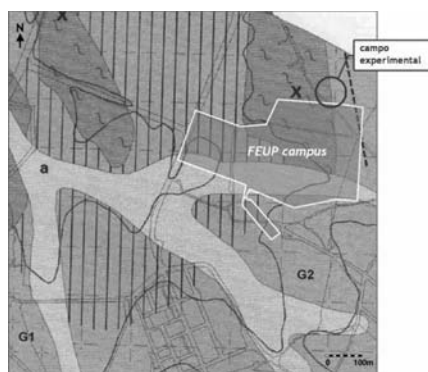
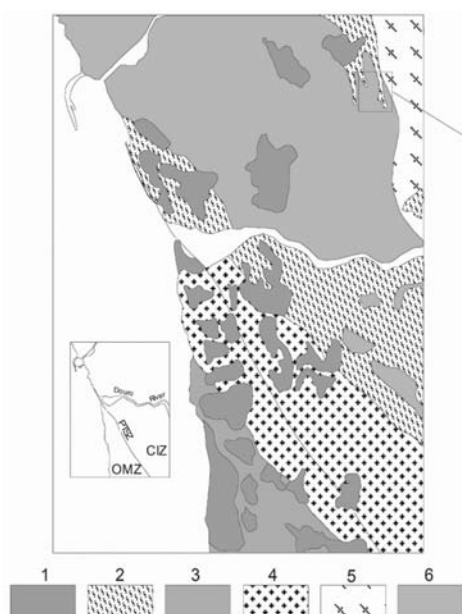
Os dados obtidos durante a exaustiva campanha de investigação in situ e em laboratório, para caracterização dos maciços envolvidos no campo experimental, foi uma oportunidade rara para comparar diferentes metodologias, aquilatando as suas vantagens e limitações relativas, assim como para averiguar as sinergias resultantes da sua integração na tentativa de construção de um modelo geológico-geotécnico fiável, para o local estudado.

## 2 – GEOLOGIA

A caracterização geológica a seguir apresentada é baseada num estudo da responsabilidade do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Porto (INETI), incidindo sobre formações e materiais localmente aflorantes ou próximos da superfície. Os mapas simplificados da Figura 1 dão uma ideia da complexidade da geologia da zona.

Com exclusão dos finos depósitos siliclásticos superficiais do Cenozóico, as restantes litologias (granitos e rochas metamórficas, incluindo xistos de alto grau, gnaisses e migmatitos), são constituintes duma formação basal fortemente deformada e metamorfizada durante a orogenia varisca (Devónico-Carbonífero). De facto, os principais traços característicos da geologia regional, são resultantes da orogenia varisca e fortemente condicionados pela proximidade de uma importante sutura tectónica – constituindo uma grande zona de falha crustal transcurrente, a falha Porto-Tomar, uma antiga fronteira entre placas do ciclo cadomiano (Ribeiro et al., 2003) que separa a parte NE da zona Centro Ibérica da zona da Ossa Morena. A sua actividade tectónica durante a orogenia varisca, favoreceu a fusão crustal e a ascensão de magmas graníticos, presumindo-se que o principal corpo granítico, presente no local estudado, tenha resultado duma fusão parcial crustal. A foliação metamórfica dominante, observada nas formações rochosas presentes, incluindo até certo ponto os granitos, é também consequência dos referidos processos tectónicos.

Os xistos, gnaisses e até migmatitos, são as formações metamórficas derivadas de uma sequência sedimentar formada por camadas de grauvaques, argilitos e conglomerados, designada por Complexo Xisto-Grauváquico.



#### Legenda:

- a - aluviões (actual e holocénico)
- X - Rochas metamórficas (Micaxistos e metagrauvaques)
- G - Rochas ígneas (rochas graníticas de duas micas)
- G1: granito de grão médio ou de médio a fino - Granito do Porto
- G2: granito de grão médio ou de médio a fino, por vezes muito orientado - Granito do Porto
- - Domínios de mais intensa caulinição
- - Xistosidade vertical

**Fig. 1** – Carta geológica do Porto, simplificada (adaptada de Pereira, 1992).

A zona mais superficial dessas formações basais, apresenta frequentemente um elevado grau de alteração, formando um nível saprolítico de espessura variável, subjacente a uma pouca espessa camada de solo e materiais antrópicos. Na zona do Porto em questão, os afloramentos pouco alterados de rochas basais são raros. De facto, o local é geologicamente formado por uma camada superficial de solo de espessura variável, sobrejacente a um granito de duas micas e com mega-cristais de feldspatos, de grão médio a grosso, mais ou menos alterado (saprolito), em contacto com um migmatito gnáissico mais antigo, com foliação predominantemente sub-vertical. Esta anisotropia estrutural, com orientação sub-vertical, pode ser considerada um factor determinante para a compreensão da “resposta” geológica dos correspondentes solos residuais, resultantes dos processos de erosão. Nesta complexa zona, estruturalmente e metamorficamente, admite-se que a transição regional entre os metassedimentos gnáissicos e a massa granítica, apresentada claramente na carta geológica 1:50.000 do Porto, não se apresenta, em geral, como uma simples superfície plana de descontinuidade, mas antes como uma transição gradual consistindo num decréscimo “probabilístico”, segundo a direcção E, das “bandas” de feldspatos, com frequentes alterações locais abruptas de litologia, embora mantendo genericamente as mesmas características de anisotropia planar. As diferenças entre os processos de alteração-erosão dos gnaisses e granitos são um factor determinante na irregularidade do perfil de alteração destas formações rochosas, assim como na irregularidade da sua distribuição espacial.

O estudo de amostras do maciço (solos e rochas), recolhidas no local em furos de sondagem, evidencia também uma grande heterogeneidade geológica: gnaisses biotíticos e magmatíticos, gnaisses cortados por filões graníticos, e um granito peraluminoso de duas micas muito alterado. Nestas amostras, os gnaisses apresentam uma intensa anisotropia planar (foliação gnáissica) com uma orientação concordante com a conhecida direcção NW-SE e inclinação 60° E da estrutura regional varisca.

Os resultados da análise granulométrica efectuada, mostrou que a dimensão das partículas, tanto de argila como de silte, decrescem com a profundidade, ao contrário do sucedido com a dimensão das partículas de areia. O mineral principal da fracção argilosa é a caolinite, observando-se uma tendência para a sua diminuição em profundidade, em concordância com o processo de meteorização da rocha. É de realçar a provável existência de um nível de percolação à profundidade de cerca de 12,7m na sondagem S3 e de cerca de 12,9m na sondagem S1, sugerido nomeadamente, pelo aumento da fracção de caolinite presente.

### 3 – CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA

Na campanha de investigação e caracterização geofísica realizada, foram utilizados diferentes métodos de superfície e em furos de sondagem, nomeadamente: sísmica, ondas S e P, de refração, convencional (RC) e tomográfica (RT), reflexão de alta resolução, cross-hole (CH) e down-hole (DH); resistividade eléctrica; radar de solos (GPR), etc.

Os resultados, directos e indirectos, provenientes da aplicação dos referidos métodos, foram comparados entre si, assim como com alguma da informação geológica e geotécnica disponível (Carvalho *et al.* e Almeida *et al.*, 2004). O mapa esquemático do local, na Figura 2, mostra a localização da vala onde se realizaram os perfis sísmicos, assim como os de resistividade eléctrica e GPR, com cerca de 50m de comprimento, adjacentes a três furos de sondagem, S1, S2 e S3, nos quais foram recolhidas amostras do maciço, previamente aos ensaios geofísicos aí realizados. A aquisição de dados CH foi feita entre os furos de sondagem S1-S2, S2-S3 e S1-S3. No furo S3, foi realizado um ensaio DH, ondas P e S, com 1.5m de intervalo entre tiros.

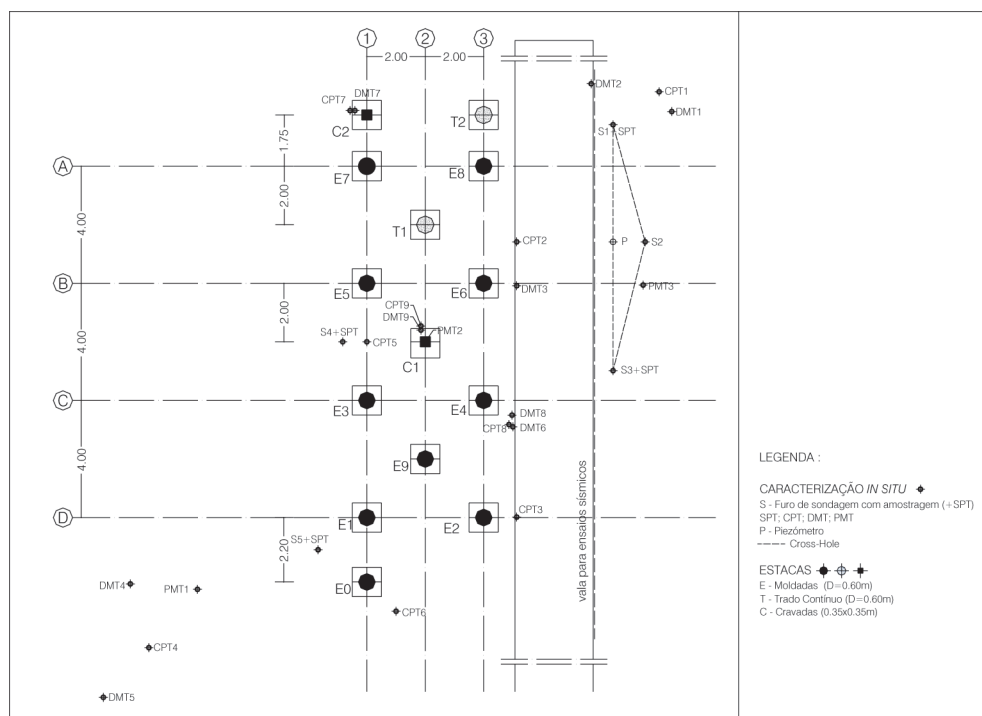


Fig. 2 – Mapa esquemático do campo experimental FEUP.

### 3.1 – Métodos geofísicos de superfície

A aquisição de dados de refração sísmica foi realizada ao longo de um perfil de 44,5m de comprimento, com um espaçamento de 1,5m entre geofones e nove pontos de tiro (geração de sinal). O aspecto genérico das dromocrónicas relativas às ondas P e S aponta para um incremento gradual da velocidade com a profundidade.

As secções de velocidades (m/s) das ondas P,  $V_P$ , e S,  $V_S$ , resultante de inversão tomográfica com o programa Seisopt@2d, são apresentadas, respectivamente, nas Figura 3 e Figura 5, tendo esta última sobreposta um modelo de duas interfaces (linhas a tracejado) obtido pelo método convencional dos tempos de atraso (“time delay method”).

Foi realizada, paralelamente ao perfil de refração sísmica, uma prospecção eléctrica com a configuração electródica pólo-pólo. Uma das secções interpretativas resultantes do método de inversão com o programa Res3dinv, é apresentada na Figura 4.

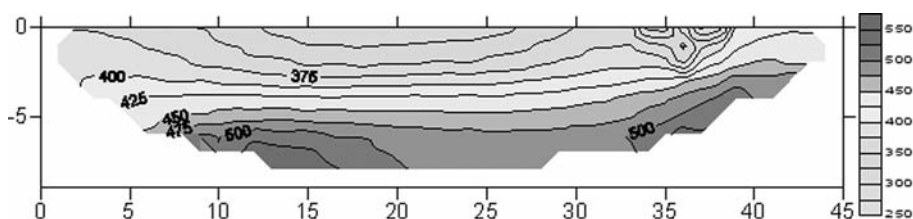


Fig. 3 – Secção de velocidades (m/s), obtidas por refração tomográfica de ondas P.

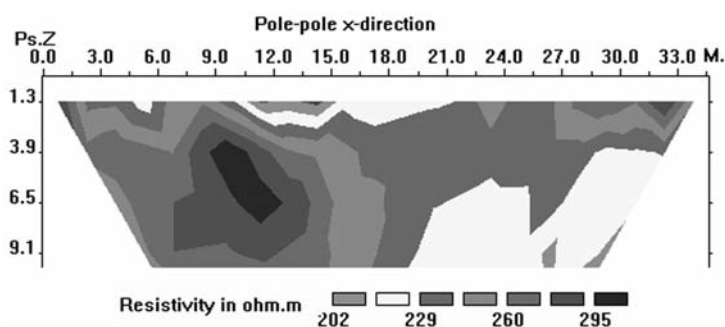
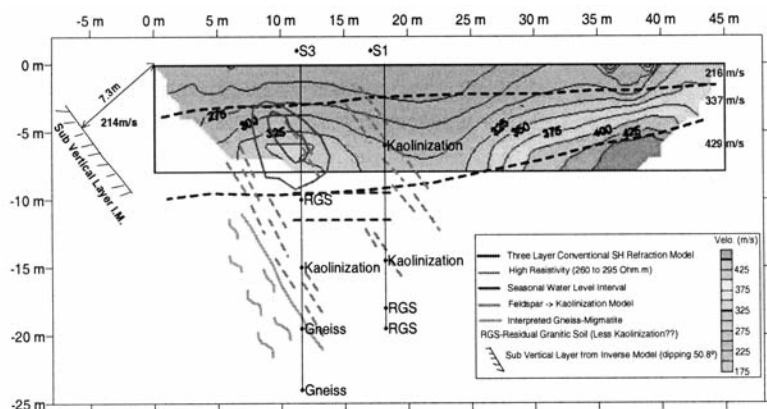


Fig. 4 – Secção de resistividade aparente (configuração electródica pólo-pólo).

O padrão geral de variabilidade das velocidades sísmicas é concordante com o obtido com a resistividade eléctrica: tanto nas secções sísmicas como eléctrica, aparece um contacto sub-vertical na parte à direita das respectivas secções, separando zonas de distintas, em média, velocidades sísmicas e resistividades aparentes. Nomeadamente, a zona à direita da secção, de menor resistividade aparente, corresponde a uma zona de maiores velocidades sísmicas presente nas secções RC e claramente confirmada na secção RT de ondas S.

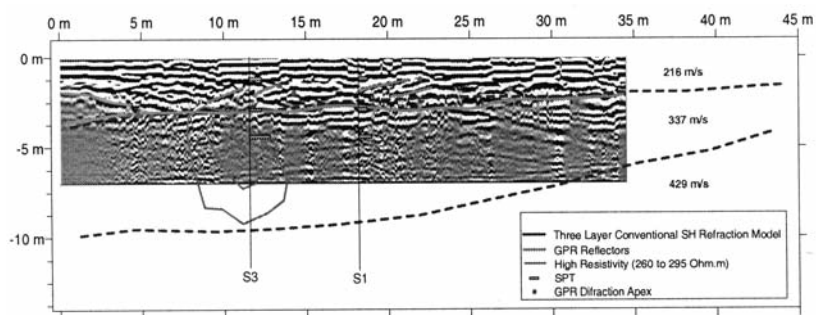
Na parte à esquerda das referidas secções, a zona de velocidades elevadas  $V_S$ , acima do nível freático, está também relacionada com a anomalia de alta resistividade representada pelo contorno

ovalizado que se pode observar na Figura 5 e interpreta-se como estando relacionada com uma camada mergulhando 60° para E, diminuída no constituinte caulino da matriz. No centro da Figura 5, a zona de baixa velocidade  $V_S$  é interpretada como uma camada mais argilosa devido ao facto de as velocidades  $V_P$  não baixarem significativamente ao longo da direcção horizontal. Assim, nesta zona central de redução da velocidade  $V_S$ , relativamente à velocidade  $V_P$ , o coeficiente de Poisson tende a aumentar para o domínio argiloso.



**Fig. 5** – Modelo 2D de refração tomográfica de velocidades de ondas S (m/s), sobreposta por outros resultados geofísicos (Carvalho *et al.*, 2004) e modelo geológico hipotético que apoiou a interpretação da reflexão sísmica (Almeida *et al.*, 2004).

O método de refração convencional (RC) revela duas interfaces (linhas a tracejado nas Figuras 5 e 6) em que a velocidade muda: a inferior é interpretada como estando relacionada com um nível freático sazonal e a superior é muito consistente, nomeadamente com a tomografia e as distribuições de velocidade de reflexão (Figura 7), assim como com os resultados do Georadar (Figura 6).



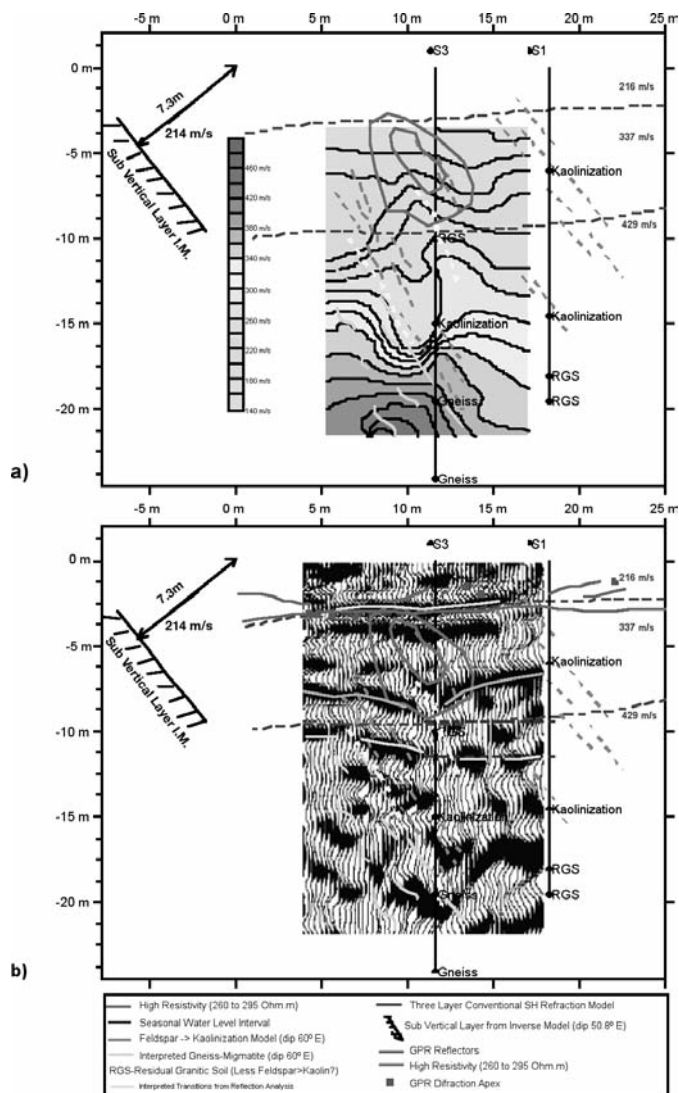
**Fig. 6** – Radargrama processado com sobreposição do modelo de refração RC, isolinhas da anomalia de alta resistividade e valores N-SPT das sondagens S3 e S1.

No radargrama processado, identifica-se um reflector bastante concordante com a primeira interface do modelo RC; os valores do número de pancadas do ensaio SPT ( $N_{SPT}$ ) aumentam entre os 3 e 4 metros de profundidade, o que reforça a suposição da existência de uma zona de transição. Existem algumas difracções visíveis, possivelmente uma zona menos alterada até 7 metros ao longo do perfil, desde a superfície até 3,5m de profundidade.



Com o objectivo de avaliar a resposta do local à reflexão de ondas S, foi realizado uma pequena campanha de reflexão após a execução de um registo de ruído (“walk away noise test”). Na Figura 7 foi sobreposta toda a informação interpretada da sísmica de reflexão, refração, resistividade, Georadar e da geologia. Na Figura 7a), o intervalo de velocidades obtidas da análise CMP é sobreposto pelo modelo de duas interfaces RC, as linhas de alta resistividade e a hipotética estrutura lateral, modelada com um mergulho de 50.8°E, a partir das reflexões sísmicas laterais dos registos.

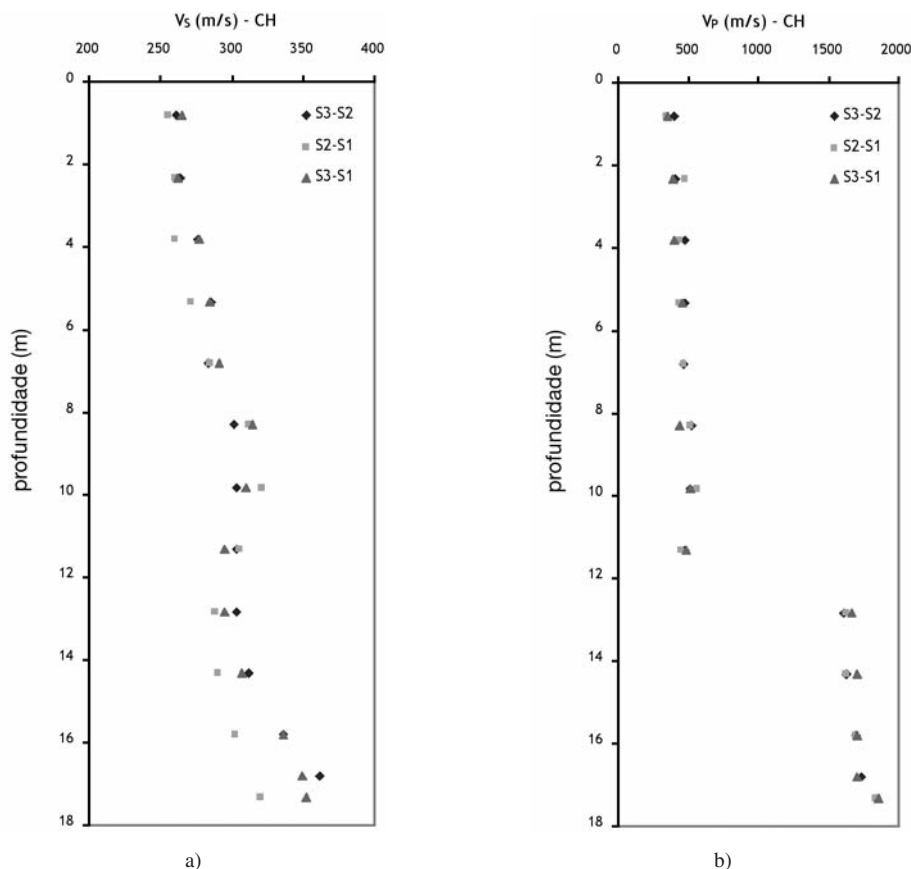
Supõe-se que este modelo esteja relacionado com as anteriormente referidas estruturas mergulhantes 60°E gnaíso-migmatíticas locais. Na Figura 7b), a secção sísmica (“stacked”) obtida tem sobreposta a interpretação sísmica e de Georadar, permitindo identificar e realçar uma significativa coerência espacial entre a informação obtida por métodos distintos.



**Fig. 7** – Integração dos modelos interpretativos parciais, tendo por base: a) modelo de velocidades de intervalo; b) secção sísmica de reflexão, ondas S.

### 3.2 – Métodos sísmicos em furo(s)

Nos três furos de sondagem S1, S2 e S3 (Figura 2), foram realizados ensaios CH e DH, ondas S e P, tendo a aquisição de dados CH sido feita entre os furos de sondagem S1-S2, S2-S3 e S1-S3. No furo S3 foi realizado um ensaio DH. O intervalo entre tiros, segundo a vertical, foi de 1,5m. Os ensaios foram realizados durante a estação seca, com o nível freático a cerca de 10m de profundidade. Na Figura 8 observa-se a boa concordância entre a variação das velocidades sísmicas,  $V_S$  e  $V_P$ , dos ensaios CH entre os furos S3-S2, S2-S1 e S3-S1.



**Fig. 8** – Velocidades sísmicas (m/s) nas secções S1-S2, S2-S3 e S1-S3, no ensaio CH:  
a) ondas S; b) ondas P.

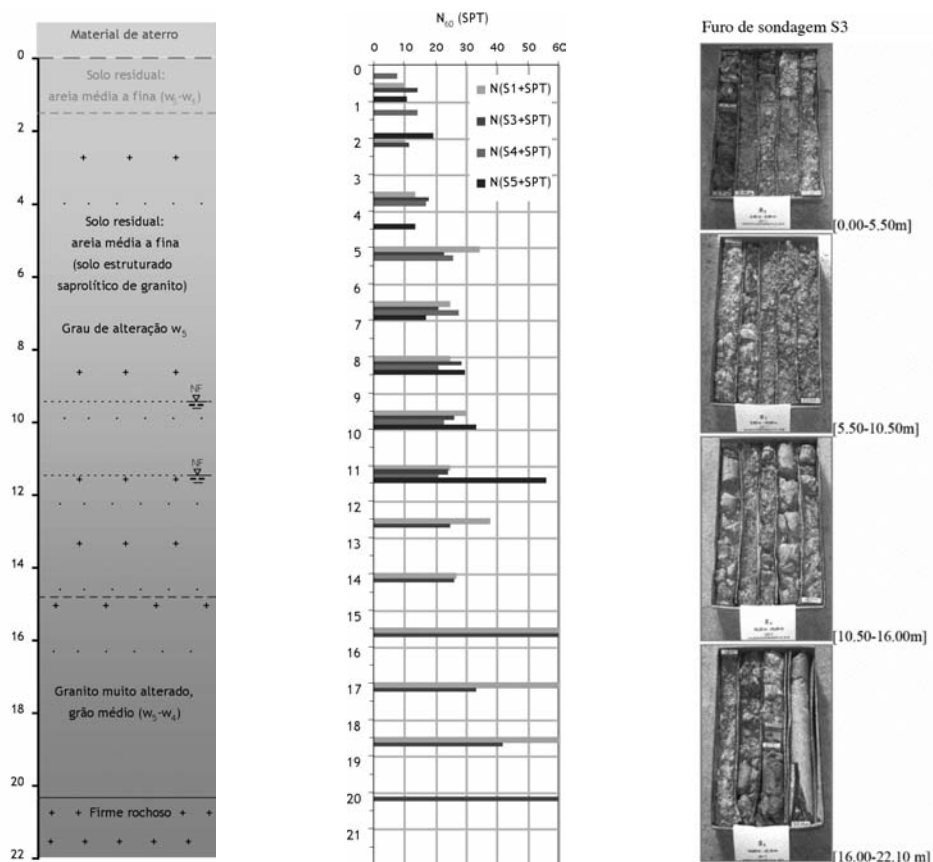
O facto das ondas P terem “detectado” a presença da água cerca de 3,5m abaixo do nível piezométrico, foi associado à grande sensibilidade das ondas P ao estado de total saturação do solo. Sugere-se a hipótese alternativa do sinal distintivo da presença do nível freático medido poder ser o decréscimo transitório em ambas as velocidades,  $V_S$ , e  $V_P$ , observável nos respectivos gráficos (Figura 8), a partir da profundidade de 11,5m.



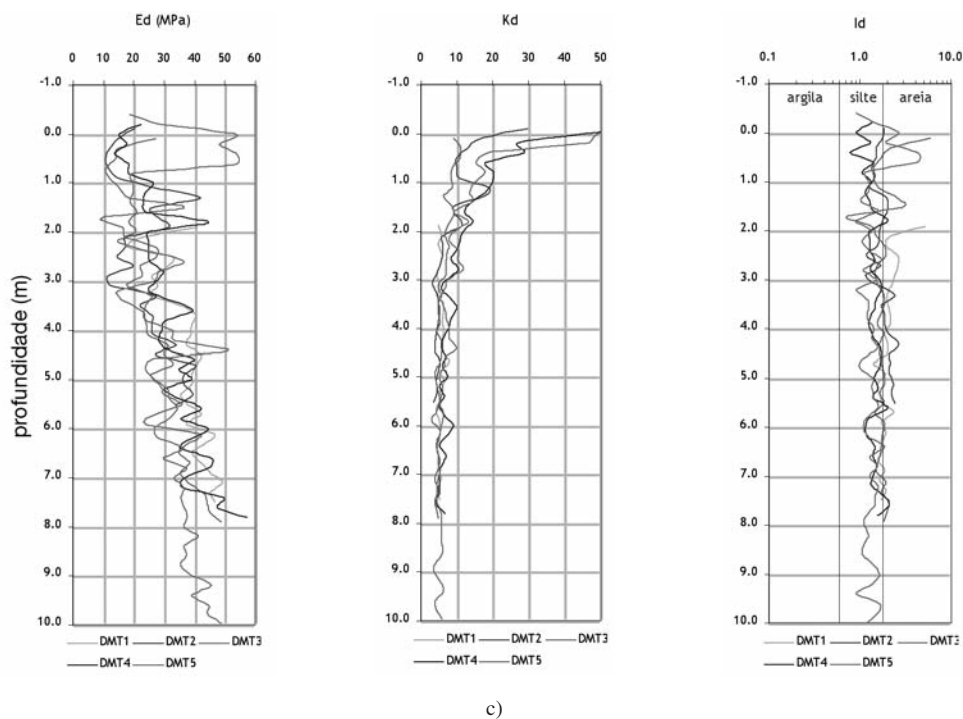
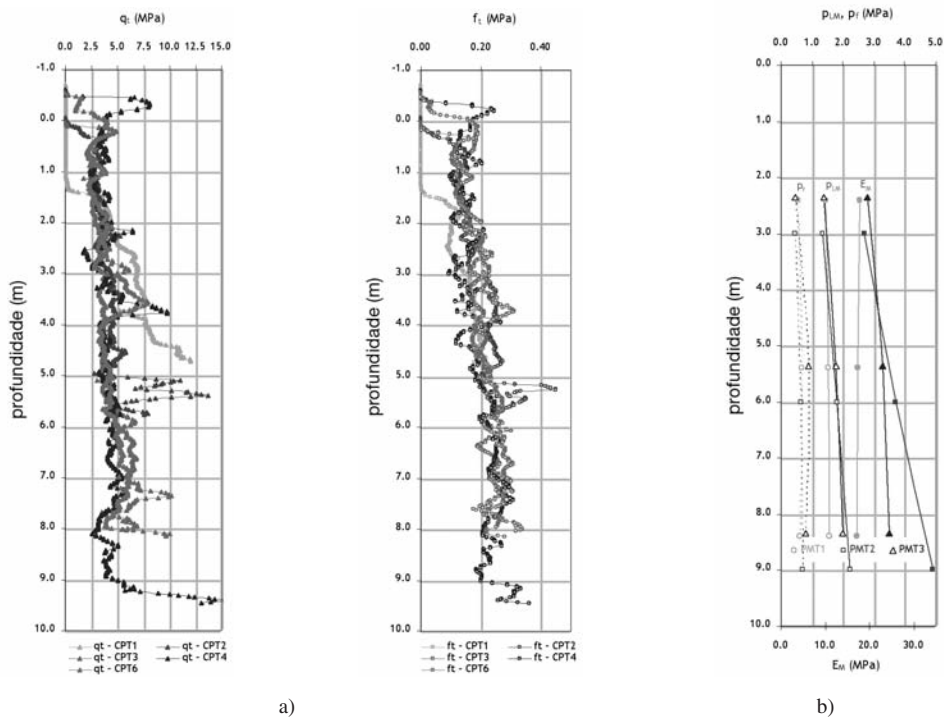
## 4 – CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

### 4.1 – Perfil geotécnico e resultados dos ensaios mecânicos *in situ*

Apesar da complexa variabilidade espacial natural da fábrica destes solos residuais, devida a alguma preservação da herança relicar da rocha mãe, é possível evidenciar um perfil relativamente homogêneo em termos geotécnicos, como o demonstram os resultados obtidos pela amostragem contínua, a trado e com o amostrador SPT - esquematizados na Figura 9 juntamente com fotografias da amostragem contínua no furo de sondagem S3 -, bem como pelas amostras indeformadas cuidadosamente colhidas (Viana da Fonseca *et al.*, 2004). Na primeira fase da caracterização geotécnica, anterior à execução das estacas moldadas, de trado contínuo e cravadas, foram realizados 4 SPT, 5 CPTU (CPT1 a CPT4 e CPT6), 5 DMT (DMT1 a DMT5) e 3 PMT, enquanto na segunda fase, após a execução das estacas, realizaram-se 4 CPTU (CPT5, CPT7 a CPT9) e 4 DMT (DMT6 a DMT9). Os principais resultados da primeira campanha de ensaios mecânicos encontram-se resumidos na Figura 10. A derivação dos resultados dos ensaios sísmicos CH em termos do módulo de distorção máximo,  $G_0$  e coeficiente de Poisson,  $\nu$ , é apresentada na Figura 11. Os valores de  $\nu$  mostram em geral uma maior dispersão, excepto na zona saturada abaixo dos 13,5m. De facto, verifica-se que os valores deste parâmetro variam em torno do valor médio de 0,25, na zona acima dos 13,5; abaixo desta profundidade, os valores mantêm-se praticamente constantes e próximos de 0,5 (cerca de 0,48), obviando um estado de saturação completa.



**Fig. 9** – Perfil geotécnico do campo experimental, resultados dos ensaios SPT e fotografias da amostragem contínua no furo S3.



**Fig. 10** – Perfis em profundidade dos ensaios in situ:  
a) CPTU:  $q_t$  e  $f_t$ ; b) PMT:  $p_f$ ,  $p_{LM}$  e  $E_M$ ; c) DMT:  $E_d$ ,  $K_d$  e  $I_d$ .

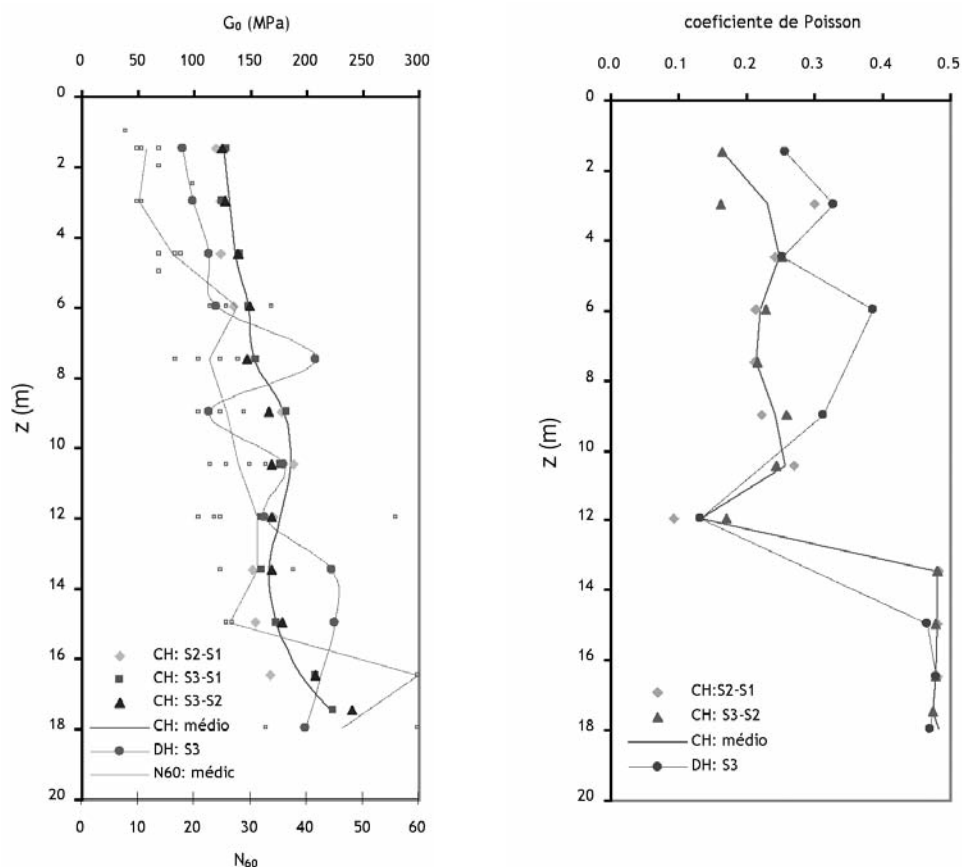


Fig. 11 – Módulo de distorção máximo, enquadrado com  $N_{60}$  do ensaio SPT e coeficiente de Poisson, derivados dos ensaios CH e DH.

## 4.2 – Resultados dos ensaios em laboratório

Tal como foi mencionado anteriormente, a caracterização geotécnica do campo experimental incluiu a recolha de um grande número de amostras indeformadas, com recurso a tubos amostradores de muito boa qualidade (Ferreira et al., 2004). Dos ensaios laboratoriais, conduzidos na primeira fase da caracterização, destacam-se 6 ensaios triaxiais drenados segundo a linha  $K_0$  ( $CK_0D$ ) - 4 dos quais em compressão com leituras de bender elements (BE) e 2 em extensão - com instrumentação local, 2 ensaios de coluna ressonante e 1 ensaio edométrico. A identificação dos provetes ensaiados é feita no Quadro 1, cuja variação em profundidade das propriedades físicas mais relevantes se ilustra na Figura 12.

Os resultados da identificação física permitem definir este material como um solo de grão médio a fino, de baixa plasticidade, geralmente classificado como uma areia siltosa (SM).

A análise dos ensaios laboratoriais permitiu obter os seguintes parâmetros de resistência:  $\phi' = 45,8^\circ$ ;  $c' = 4,5$  kPa. Do ensaio edométrico foi possível definir os parâmetros de compressibilidade:  $N = 1,66$  e  $\lambda = 0,103$ .

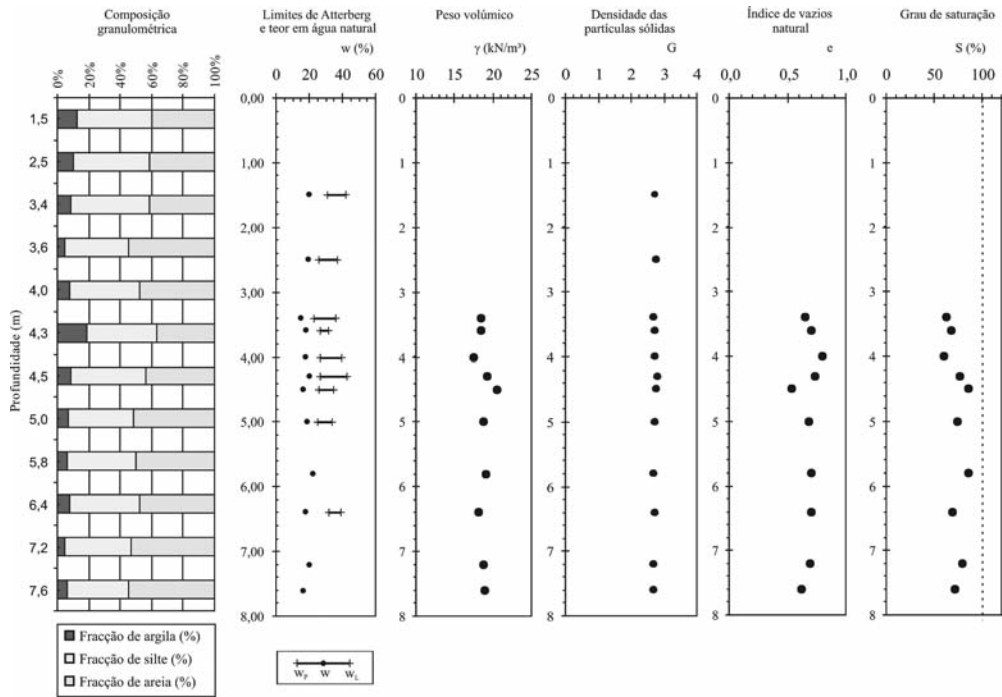
**Quadro 1** – Lista de provetes ensaiados em laboratório e respectivas propriedades.

Proвете prof. (m)	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	w %	e	Sr %	w <sub>L</sub> %	w <sub>P</sub> %	<2um %	<#200 %	<#10 %	Método de ensaio	$\sigma'_{cv}$ (kPa)
S2/1(c): 3,2	18,2	16,3	0,72	62	32	27	5,3	38,5	85,0	Triaxial de compressão <sup>1</sup>	60,0
S2/2(e): 3,5	16,6	18,8	0,93	56	–	–	–	–	–	Triaxial de extensão <sup>2</sup>	60,0
S2/3(c): 4,0	18,4	16,2	0,75	61	44	27	9,5	47,2	74,4	Triaxial de compressão <sup>1</sup>	90,0
S2/4(e): 4,4	18,4	21,7	0,83	74	–	–	–	–	–	Triaxial de extensão <sup>2</sup>	80,0
S2/5(c): 5,5	19,0	22,5	0,71	86	NP	NP	7,7	41,2	82,5	Triaxial de compressão <sup>1</sup>	100,0
S2/6(c): 7,0	19,0	20,2	0,68	81	NP	NP	3,3	40,7	86,9	Triaxial de compressão <sup>1</sup>	140,0
S5/1: 4,0	20,0	13,8	0,50	74	–	–	–	–	–	Coluna Ressonante	80,0
S5/2: 6,3	17,8	22,1	0,82	73	–	–	–	–	–	Edômetro	–
S5/3: 8,0	19,0	19,7	0,66	80	–	–	–	–	–	Coluna Ressonante	160,0

# Peneiros da série ASTM.

(1) Ensaios CK<sub>u</sub>(=0,5)D com controlo de tensões:  $\sigma'_v \gg \sigma'_h$  = ctt; medição de  $V_s$  por *bender elements*.

(2) Ensaios CK<sub>u</sub>(=0,5)D com controlo da trajectória de deformações:  $\sigma'_v \gg \sigma'_h$  = ctt



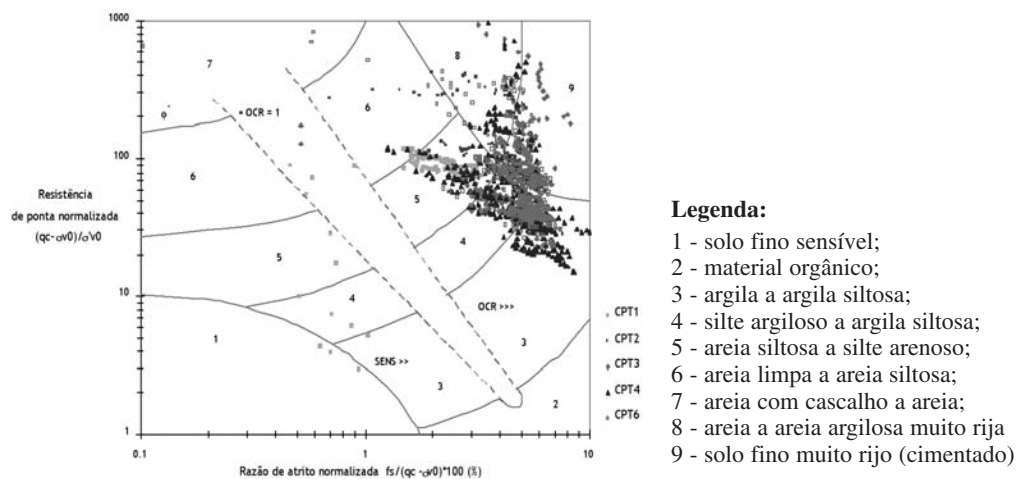
**Fig. 12** – Perfis em profundidade das propriedades físicas do solo do campo experimental.

## 5 – TENDÊNCIAS GERAIS E CORRELAÇÕES

A partir da base de dados de ensaios disponível, que se encontra detalhada noutros trabalhos (Viana da Fonseca *et al.*, 2004, Carvalho *et al.*, 2004), foram derivadas algumas correlações interessantes. Os valores de  $(N_1)_{60}$  obtidos nos ensaios SPT permitiram deduzir um ângulo de resistência ao corte a partir da proposta de Décourt (1989) variando entre 35° e 41°, com um valor

médio de 38°. Este valor coincide com outros valores obtidos noutros campos experimentais em solos residuais similares, da mesma região, apresentados nomeadamente em Viana da Fonseca (2003).

O gráfico de Robertson (1990) que classifica o solo a partir dos resultados dos ensaios CPT, identifica este material como cimentado e antigo, ou sobreconsolidado (“aged”), com uma distribuição granulométrica desde as argilas siltosas às areias argilosas. Os resultados dos ensaios laboratoriais, já apresentados, tendem essencialmente para a classificação como uma areia silto-argilosa. Os resultados da primeira fase de ensaios CPT(U), enquadrados nesse gráfico, são apresentados na Figura 13.

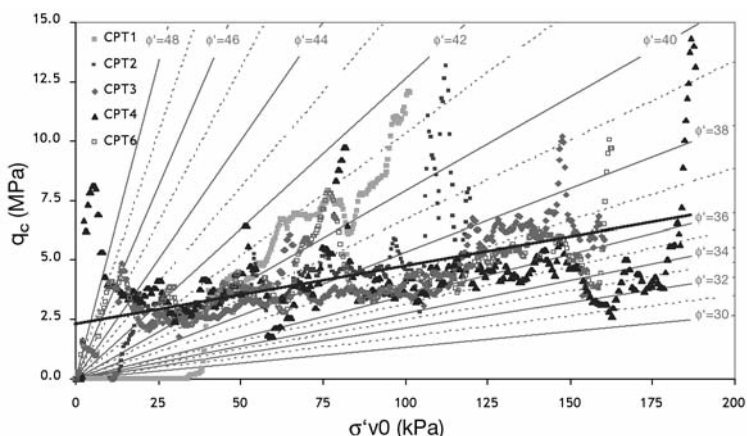


**Fig. 13** – Classificação do comportamento do solo (adaptado de Robertson, 1990).

É possível observar uma dispersão significativa em termos da classificação, facto que foi já identificado por diversos autores em campos experimentais de solos residuais distintos, nomeadamente Mayne e Brown (2002). Como discutem Viana da Fonseca et al. (2005), estas classificações são muitas vezes desajustadas a uma boa identificação destes solos. Uma análise mais aprofundada sobre a aplicabilidade destas classificações clássicas com base em ensaios mecânicos in situ e de outras novas tendências de classificações foi recentemente elaborada (Viana da Fonseca et al., 2006).

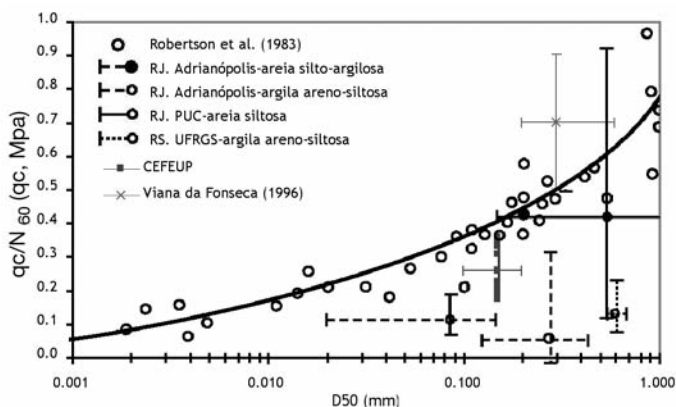
A relação entre o parâmetro  $q_c$  do ensaio CPT e a tensão efectiva vertical de repouso,  $\sigma'_{v0}$ , é apresentada na Figura 14, onde se incluem as curvas de Robertson e Campanella (1983) para estimativa do ângulo de resistência ao corte. Interessa realçar que esta proposta de Robertson e Campanella tende a atribuir valores mais elevados de  $\phi'$ , sobretudo nas profundidades mais baixas, do que aqueles obtidos em ensaios triaxiais, em virtude de não ser tida em conta a componente coesiva do solo. Este facto reflecte a sensibilidade simultânea do parâmetro  $q_c$ , às componentes friccional (atrítica) e coesiva. No caso presente, os resultados do CPT revelam um crescimento moderado de  $q_c$  em profundidade, atravessando uma vasta gama de ângulos de atrito (35-42°) com maior incidência a 37°, os quais são significativamente inferiores aos obtidos nos ensaios laboratoriais.

Esta constatação é, na realidade, uma consequência do comportamento coesivo-friccional destes solos, nos quais a componente coesiva condiciona o comportamento nos baixos níveis de confinamento, sendo progressivamente dominado pelo atrito nos níveis mais elevados.



**Fig. 14** – Relação entre os valores de  $q_c$  e  $\sigma'_{v0}$ , e o ângulo de resistência ao corte,  $\phi'$  (Robertson and Campanella, 1983).

As correlações entre os parâmetros dos ensaios de penetração SPT e CPT são reconhecidamente úteis, podendo ser feitas através da avaliação da razão  $q_c/N_{60}$  e a sua dependência com a dimensão média das partículas,  $D_{50}$  (Robertson e Campanella, 1983). Neste campo experimental, constatou-se que esta razão varia entre 0,17 to 0,36 ( $D_{50} = 0,15\text{mm}$ ), como se mostra na Figura 15.



**Fig. 15** – Gamas de  $q_c/N$  versus  $D_{50}$  em solos residuais brasileiros, comparados com os resultados dos campos experimentais do Porto (baseados em Danziger *et al.*, 1998).

Os resultados deste campo experimental convergem com os dados de campos experimentais brasileiros (Danzinger *et al.*, 1998), apesar de serem algo contraditórios com os resultados apresentados por Viana da Fonseca (1996) em solos residuais similares. É provável que esta discrepância se deva à maior percentagem de argila do solo em estudo.

As análises preliminares dos ensaios DMT e PMT permitiram a identificação do solo, como mostra por exemplo o gráfico de  $I_p$  da Figura 10c), classificando-o essencialmente como uma areia siltosa ou um silte. Esta classificação converge com os ensaios de identificação (Quadro 1 e Figura 12) e contrasta com a derivada dos ensaios de penetração, nomeadamente dos gráficos baseados no CPT(U), como explicam Viana da Fonseca *et al.* (2004).



A rigidez a muito pequenas deformações, traduzida habitualmente pelo módulo de distorção máximo,  $G_0$ , é reconhecidamente um parâmetro de referência. De facto, este módulo, quando devidamente normalizado relativamente ao índice de vazios e à tensão efectiva, é praticamente independente do tipo e número de ciclos de carregamento, da velocidade de deformação, da história de tensões e deformações, entre outros. Trata-se, por isso, de um parâmetro fundamental do solo, que revela bem o seu comportamento elástico.

Tal como se apresentou nas Figuras 8 e 11, os resultados dos ensaios sísmicos entre furos (CH) são bastante consistentes, evidenciando um crescimento muito ligeiro do módulo de distorção máximo em profundidade. A análise da variação de  $G_0$  com a tensão efectiva média,  $p'_0$ , devidamente normalizada, tendo em conta a função do índice de vazios em profundidade, conduziu à seguinte relação:

$$\frac{G_0}{F(e)} = A \cdot p'_0{}^m = 110 \cdot p'_0{}^{0,02} \quad (G_0 \text{ em MPa e } p'_0 \text{ em kPa}) \quad (1)$$

$$\text{onde } F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (2)$$

O valor da constante  $A$  na expressão de  $G_0$  é bastante superior nestes solos residuais ( $A=110$ ) do que em solos arenosos transportados ( $A=7,9$  to  $14,3$ ), em areias aluvionares naturais, antigas e cimentadas (Ishihara, 1982). Por outro lado, o expoente  $m$ , que reflecte a influência da tensão efectiva média, é significativamente mais baixo. Noutros solos residuais do granito do Porto, Viana da Fonseca (2003) definiu parâmetros diferentes, apresentados na equação (3), que traduzem uma dependência ligeiramente maior de  $G_0$  em relação a  $p'_0$ . Esta diferença pode ser explicada pelo facto de as condições de saturação dos solos desses campos experimentais serem distintas.

$$\frac{G_0}{F(e)} = 65 \cdot p'_0{}^{0,07} \quad (3)$$

As correlações entre os parâmetros dos ensaios mecânicos *in situ*, nomeadamente  $N_{SPT}$  e  $q_c$  são muito sensíveis a diversos factores, ao mesmo tempo que são praticamente independentes de outros factores marginais, como o efeito de escala ou a não-linearidade. Por este facto, é interessante analisar estas relações.

Stroud (1988) sugeriu a adopção de uma relação simples, mas muito útil entre  $N_{60}$  e  $G_0$ , considerando uma lei de potência. Assim, para os resultados dos ensaios SPT deste campo experimental, próximos dos furos de sondagem onde foram realizados os ensaios CH, obteve-se a seguinte relação:

$$G_0 \text{ (MPa)} = 63 \cdot N_{60}{}^{0,30} \quad (3)$$

Por outro lado, as correlações entre  $q_c$  e  $G_0$  são muito influenciadas pela cimentação (ou sobreconsolidação) do solo. Robertson *et al.* (1995) propuseram um gráfico baseado na resistência de ponta normalizada  $Q_t$  e em  $G_0/q_c$  que permite a identificação de solos “não convencionais” como são as areias de alta compressibilidade, os solos cimentados ou sobreconsolidados e as argilas com índices de vazios muito baixos ou elevados. Este gráfico é apresentado na Figura 16, onde estão também ilustrados os resultados do CEFEP.

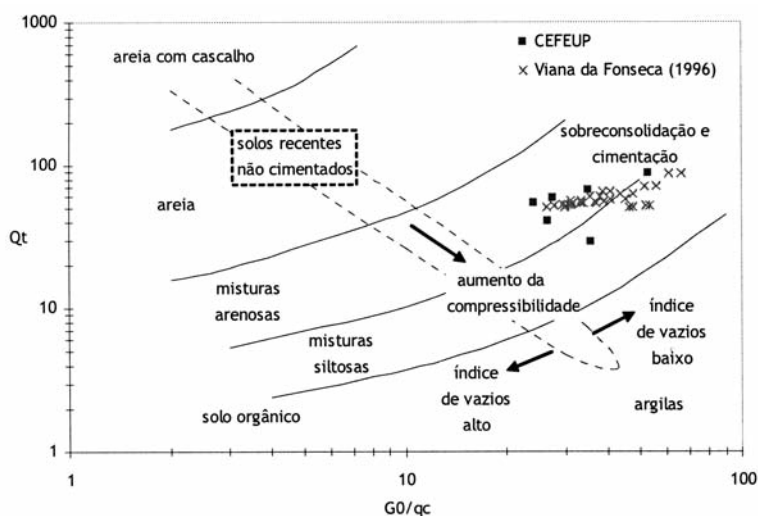


Fig. 16 – Classificação baseada em  $Q_t$  e  $G_0/q_c$  (adaptado de Robertson *et al.*, 1995).

Finalmente, é de referir que foi feita uma análise comparativa das velocidades das ondas sísmicas, em particular das ondas de corte, medidas *in situ* em ensaios CH e em laboratório com bender elements ou na coluna ressonante. Foi observado um grande paralelismo (ou seja, semelhança na tendência) da evolução em profundidade dos perfis das velocidades  $V_s$ , determinadas no campo e em laboratório. O desfasamento entre essas linhas de tendência é atribuído à perturbação causada pelos processos de amostragem, como se discute em Viana da Fonseca *et al.* (2004) e Ferreira *et al.* (2004).

## 6 – CONCLUSÕES

A extensa campanha de investigação e caracterização realizada no campo experimental do ISC2-FEUP permitiu a determinação das propriedades geotécnicas mais relevantes deste perfil de solo residual, bem como a derivação e comparação das correlações obtidas com outras propostas referentes a solos residuais.

Este trabalho pretendeu apresentar sumariamente a tendência geral observada nos ensaios mecânicos realizados *in situ* e a aplicação de métodos geofísicos de superfície e em furos de sondagem para o mapeamento e para a caracterização geotécnica do solo.

Este solo residual saprolítico do granito do Porto foi classificado, em termos clássicos, como uma areia silto-argilosa e esta definição é sustentada pela maioria dos resultados dos diferentes ensaios *in situ* e de laboratório.

Uma das conclusões mais relevantes é a elevada correlação verificada na estrutura de variabilidade espacial apresentada pelos modelos sísmicos e eléctricos, bem como a grande consistência e similitude no padrão das interfaces, comuns aos modelos interpretativos representados nas secções sísmicas de reflexão das ondas S, refração convencional e tomográfica e radargrama. Também, os campos de velocidade da onda SH, obtida por ensaios CH, de reflexão e refração, assim

como o modelo de resistividade, são coerentes com as evidências geológicas do local. Os modelos da refração sísmica e da resistividade eléctrica, apontam para a adequação de ambos os métodos no mapeamento, tanto vertical como horizontalmente, das heterogeneidades deste tipo de maciços. Foram apresentados alguns modelos de interpretação geológica, nos quais está integrada e reunida a informação proveniente, nomeadamente, da sísmica de refração, reflexão superficial de alta resolução, e Georadar.

## 7 – AGRADECIMENTOS

Muito especiais e gerais às empresas que permitiram este trabalho (Mota-Engil, SA – da Direcção de Fundações Especiais; Teixeira Duarte, Sopecate, SA; e Tecnasol FGE, SA) e particulares ao Eng. Ricardo de Andrade e ao Eng. Nuno Cruz, aos Dr. Eurico Pereira e Dr. José Feliciano do INETI, e também um reconhecimento à FEUP, à reitoria da Universidade do Porto, ao INEGI, INETI, ao CICCOPN e à empresa A. M. Mesquita & Filhos. O trabalho foi possível graças ao empenho e bom profissionalismo do pessoal do LabGeo da FEUP. Este trabalho integra-se na actividade de investigação do CEC da FEUP, em particular no Projecto de Investigação POCI/ECM/55589/2004, e do ICIST do IST, centros da Fundação para a Ciência e Tecnologia do MCES.

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.; Hermosilha, H.; Carvalho, J.M.; Viana da Fonseca, A.; Moura, R. (2004). *ISC'2 experimental site investigation and characterization: From SH waves high resolution shallow reflection to shallower GPR tests*. Geotechnical & Geophysical Site Characterization. A. Viana da Fonseca & P.W.Mayne (Eds.). Millpress, Rotterdam
- Carvalho, J.M.; Viana da Fonseca, A.; Almeida, F.; Hermosilha, H. (2004). *ISC'2 experimental site investigation and characterization: Conventional and tomographic P and S waves refraction seismics vs. electrical resistivity*. Geotechnical & Geophysical Site Characterization. A. Viana da Fonseca & P.W.Mayne (Eds.). Millpress, Rotterdam.
- Danzinger, F.A.B.; Politano, C.F.; Danzinger, B.R. (1998). *CPT-SPT correlations for some Brazilian residual soils*. First International Conference on Site Characterization, ISC'98, Vol.2, pp. 907-912. Balkema, Rotterdam.
- Décourt, L. (1989). *The standard penetration test. State of the Art Report*. Actas da XII ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 4, pp. 2405-2416. Balkema, Rotterdam.
- Ferreira, C.; Mendonça, A.A.; Viana da Fonseca, A. (2004). *Avaliação da qualidade de amostragem em campos experimentais de solos residuais de granito do Porto*. Actas do 9º Congresso Nacional de Geotecnia - 2º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Aveiro, Portugal. Vol. 1, pp. 27-38. SPG, Lisboa.
- Ishihara, K. (1982). *Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis*. Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp. 237-259.
- Mayne, P.W.; Brown, D.A. (2002). *Site characterization of Piedmont residuum of North America*. Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Vol. 2, pp.1323-1339. Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Pereira, E. (1992). *Mapa Geológico de Portugal*, à escala 1:200 000, Folha nº.1, INETI, Porto.

- Ribeiro, A.; Marcos, A.; Pereira, E.; Llana-Fúnez, S.; Farias, P.; Fernández, F. J.; Fonseca, P.; Chaminé, H.; Rosas, F. (2003). *3-D strain in the Ibero-Armorican Arc: a review*. Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº especial, pp. 54-55.
- Robertson, P.K. (1990). *Soil classification using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, pp. 151-158.
- Robertson, P.K.; Campanella, R.G. (1983). *Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand; Part II: Clay*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, Nº 4, pp. 718-745.
- Robertson, P.K.; Sasitharan, S.; Cunnings, J.C.; Segs, D.C. (1995). *Shear wave velocity to evaluate flow liquefaction*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 121, Nº 3, pp. 262-273.
- Stroud, M.A. (1988). *The standard penetration test - its application and interpretation*. Proceedings of the Geotechnical Conference on Penetration Testing in U.K., Birmingham, pp. 24-49. Thomas Telford, London.
- Viana da Fonseca, A. (1996). *Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios de dimensionamento de fundações directas*. Dissertação apresentada na Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Viana da Fonseca, A. (2003). *Characterizing and deriving engineering properties of a saprolitic soil from granite, in Porto*. Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. Tan et al. (Eds.), pp.1341-1378. Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Viana da Fonseca, A.; Carvalho, J.; Ferreira, C.; Santos, J. A.; Almeida, F.; Pereira, E.; Feliciano, J.; Grade, J.; Oliveira, A. (2005). *Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques*. Geotechnical & Geological Engineering, Kluwer-Springer (em impressão).
- Viana da Fonseca, A.; Carvalho, J.; Ferreira, C.; Tuna, C.; Costa, E.; Santos, J. (2004). *Geotechnical characterization of a residual soil profile: ISC'2 experimental site*. Geotechnical & Geophysical Site Characterization. A. Viana da Fonseca & P.W.Mayne (Eds.). Millpress, Rotterdam.
- Viana da Fonseca, A.; Costa Esteves, E.; Ferreira, C. (2006). *Classificações de solos residuais do granito do Porto com base em ensaios SPT, CPT(U), DMT e CH: novas tendências*. Aceite para publicação nas Actas do 10º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa, SPG.