

CAMPO EXPERIMENTAL DO ISC'2 – PREVISÃO E DESEMPENHO DE ESTACAS INSTRUMENTADAS SOLICITADAS AXIALMENTE

ISC'2 experimental site – prediction & performance of instrumented axially loaded piles

Jaime A. Santos*

António Viana da Fonseca**

Elisabete Costa Esteves***

RESUMO – Este trabalho insere-se num projecto de investigação para estudo do comportamento de estacas em solos residuais. Nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) foi desenvolvido um campo experimental num perfil de solo residual (saprolítico) do granito. Foi efectuada uma exaustiva caracterização do local, incluindo um grande número de ensaios de caracterização *in situ* para desenvolver um “exercício internacional de previsão do comportamento de estacas: moldada, trado contínuo e cravada” - *International Prediction Event (Class A)*. Investigadores e projectistas foram convidados a participar neste evento de previsão do comportamento real das estacas. Vários ensaios *in situ* foram realizados – ensaios de penetração: SPT e CPTU; ensaios pressiométricos e dilatométricos: PMT e DMT; ensaios sísmicos: cross-hole (CH) e down-hole (DH). Além disso, foi executado um programa de ensaios de laboratório, incluindo ensaios de consolidação em edómetro, ensaios triaxiais Ck_0D com sensores de deformação local e transdutores piezoelétricos, assim como ensaios de coluna ressonante. Este artigo centra-se nos ensaios de carga verticais estáticos e apresenta-se uma análise das previsões dos participantes do evento.

SYNOPSIS – This paper is part of a joint research project to study the behaviour of piles in residual soil. An experimental test site on residual (saprolitic) soil from granite was constructed at the Faculty of Engineering of the University of Porto. A very extensive site characterization has been held, including a large variety of *in situ* tests in order to develop an *International Prediction Event (Class A)* of Bored, CFA and Driven Piles. Researchers and designers were invited to deal with this investigation results in order to predict the real response of the pile foundations. Several *in-situ* testing techniques were used - penetration tests: SPT and CPTU; pressuremeter and dilatometer tests: PMT and DMT; seismic tests: cross-hole (CH) and down-hole (DH). Undisturbed samples were recovered and an extensive laboratory-testing program was carried out, including oedometric consolidation tests, Ck_0D triaxial tests using local strain measuring devices and bender-extender elements, as well as resonant column tests. This paper focuses on the axial pile load tests and an analysis of the predictions is presented.

1 – INTRODUÇÃO

A cidade do Porto, e boa parte da região Norte, caracteriza-se por ter um subsolo granítico que é em grande medida dominado, nos horizontes implicados pelas obras de construção civil, por solos residuais recentes (saprolíticos), em particular de rochas graníticas. Este tipo de solos, em alguns

* Prof. Auxiliar do DECivil do Instituto Superior Técnico da Univ. Técnica Lisboa; jaime@civil.ist.utl.pt

** Prof. Associado do Dep. Eng. Civil da Faculdade Engenharia da Univ. Porto; e-mail: viana@fe.up.pt

*** Mestre em Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica da FEUP, Assistente no ISEP; elisabete@fe.up.pt

casos, atinge profundidades que podem rondar os 20m, sendo mais comuns profundidades entre 5 a 10m. Este subsolo granítico caracteriza-se por perfis de grande e errática heterogeneidade, tendo o emprego de estacas em fundações sofrido uma marcante evolução nos últimos anos. Constituem as fundações de estruturas de médio e grande porte mais utilizadas actualmente. Este uso cada vez mais frequente de estacas deve-se em boa medida ao grande desenvolvimento dos meios e processos de execução, bem como ao desenvolvimento dos materiais empregues na sua realização. Desta forma, torna-se crucial o conhecimento do seu modo de funcionamento e dos parâmetros de cálculo usados no seu dimensionamento.

São muitos os factores que influenciam o comportamento das fundações indirectas, nomeadamente a natureza do maciço, o grau de perturbação causado pela sua execução, o efeito de escala, o tipo e a magnitude das solicitações, etc. Alguns destes factores são de difícil ou mesmo impossível caracterização, pelo que ainda hoje é grande a indefinição sentida sobre os critérios de dimensionamento de estacas, particularmente em solos residuais. Desta forma, torna-se imperioso a realização de ensaios de carga em estacas executadas nas mesmas condições da prática corrente e munidas de instrumentação que permita a observação das respostas localizadas, quer ao longo do fuste, quer na base.

Com o propósito de responder às questões muito sucintamente acima esboçadas, desenvolveu-se um campo experimental num maciço de solo residual do granito, em terrenos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), realizando-se uma vasta campanha de investigação geotécnica que compreendeu um número significativo de ensaios *in situ* e laboratoriais. Posteriormente, foram executadas e ensaiadas à compressão vertical três estacas em betão armado de diferentes tipologias: moldada com 600mm de diâmetro com recurso a tubo metálico, trado contínuo com 600mm de diâmetro e pré-fabricada cravada dinamicamente quadrada com 350mm de lado. As que foram objecto de ensaio tinham 6m de comprimento útil (ou seja, no interior do terreno) enquanto as de reacção tinham 22m de comprimento. Esta investigação foi potenciada pela lançamento de um “exercício internacional de previsão do comportamento de estacas com base em ensaios de caracterização”: *International Prediction Event - Class A* (porque os ensaios são realizados após as previsões estarem “fechadas”), apoiada pelo comité TC18 da ISSMGE e enquadrado na 2nd *International Conference on Site Characterization (ISC’2)* realizada no Porto.

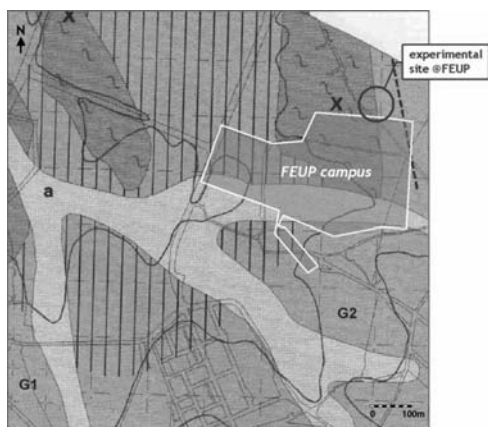
2 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO CAMPO EXPERIMENTAL

O campo experimental desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, situa-se dentro dos limites do Campus do Pólo II da UP conforme ilustrado na Figura 1. A identificação dos complexos geológicos que afloram no local encontram-se sumariamente descritos na legenda da mesma.

Como se pode observar, o campo experimental está situado numa zona de interface com um complexo xisto-grauváquico, mas onde predominam rochas ígneas, particularmente de granito de grão médio ou médio a fino, por vezes com uma elevada orientação (fruto de um tectonismo regional elevado e muito irregular), conhecido por Granito do Porto.

De acordo com os ensaios de identificação efectuados, estes solos saprolíticos apresentam grão médio a fino e baixa plasticidade, classificando-se como solos areno-siltosos.

Foi conduzido um grande número de ensaios *in situ*, antes e após execução das estacas, nomeadamente 5 sondagens com amostragem contínua, sendo em quatro delas realizados ensaios SPT de 1,5m em 1,5m; 9 CPT(U); 9 DMT; 3 PMT; e diversos tipos de ensaios geofísicos (CH, DH, SASW,



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 caulnização
- - Xistividade vertical

Fig. 1 – Caracterização geológica do campo experimental: Mapa Geológico do Porto (Viana da Fonseca *et al.*, 2004).

CSWS, etc.) (Viana da Fonseca *et al.*, 2006). Das amostras indeformadas de boa qualidade, recolhidas em amostradores duplos com bisel cortante otimizado e liners de PVC, foram realizados 6 ensaios triaxiais CK₀D, 4 em compressão com medição de velocidades de ondas sísmicas S e P com recurso a bender-extend elements (Viana da Fonseca e Ferreira, 2002) e 2 em extensão com medição local das deformações, 2 ensaios de coluna ressonante e um ensaio edométrico.

Na Figura 2 apresenta-se alguns resultados obtidos, mas mais informação pode ser encontrada em Viana da Fonseca *et al.* (2006).

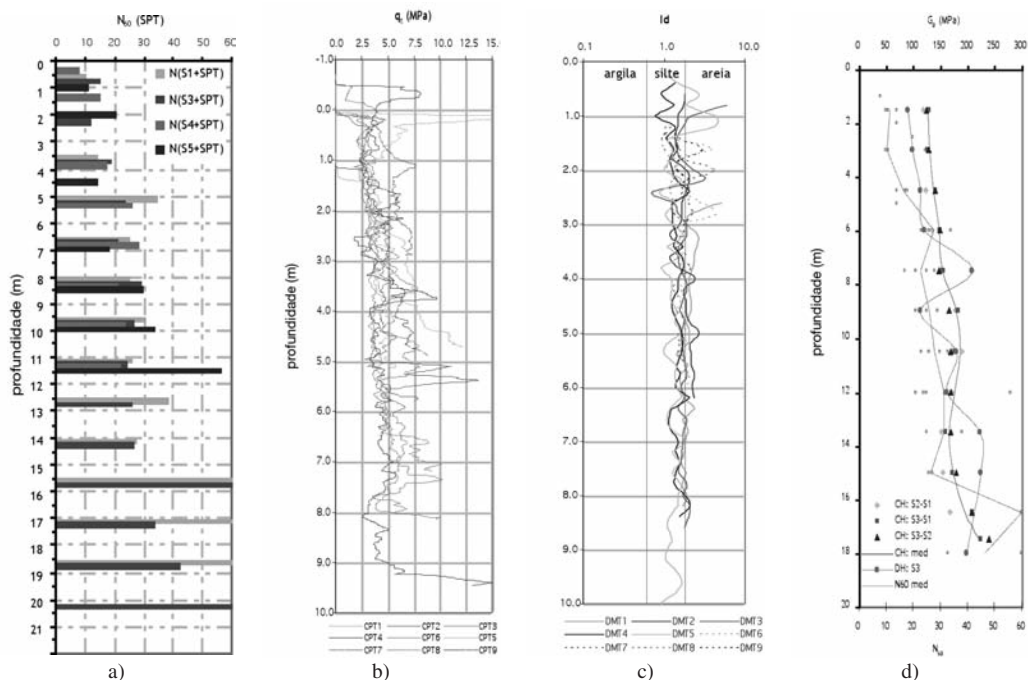
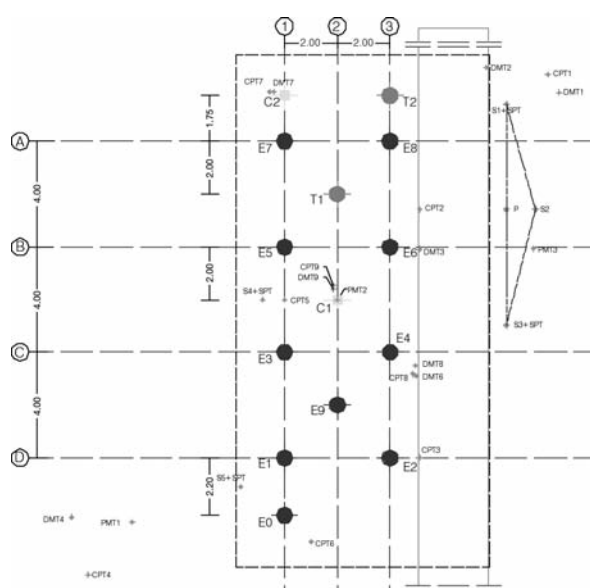


Fig. 2 – Alguns resultados dos ensaios realizados no campo experimental: a) SPT; b) CPT(U); c) DMT; d) geofísicos (CH e DH).

3 – EXECUÇÃO DAS ESTACAS

Como se referiu acima, foram executadas um total de 14 estacas, sendo dez moldadas de 600mm de diâmetro com recurso a tubo moldador metálico, sendo duas mais curtas, de 6m de comprimento (E0 e E9), e oito com 22m úteis, que serviram de reacção para a actuação do carregamento (E1 a E8), duas de 600mm de diâmetro com recurso à técnica do trado contínuo CFA (T1 e T2) e duas pré-fabricadas cravadas com secção de 350mm_350mm (C1 e C2), sendo estas últimas duas tipologias de 6m de comprimento. As estacas moldadas foram executadas pela Divisão de Fundações Especiais da Mota-Engil, SA, as de trado contínuo pela Teixeira Duarte, Engenharia e Construção, SA, e as cravadas pré-fabricadas pela Sopecate, Soc. Pesquisas, Captações de Água e Transportes, SA.

A localização das estacas e os ensaios realizados antes e após a sua execução encontram-se esquematizados na Figura 3.



Legenda:

Estacas: E – Moldada de 0.60m. T – Trado Contínuo de 0.60m. C – Cravada de 0.35 x 0.35m.

Prospecção: S – Sondagem com Recolha de Amostras. SPT; CPT; DMT; PMT; DPSH; SP.

Fig. 3 – Planta com a localização das estacas e dos ensaios *in situ*.

O sistema de reacção para os ensaios de carga verticais, foi materializado pelas já referidas oito estacas moldadas mais longas, designadas na Figura 3 por E1 a E8 com 22m de profundidade útil (no terreno natural). As restantes estacas foram executadas com 6m de comprimento, sendo as estacas E9, C1 e T1 sujeitas ao ensaio de carga estático. As características pretendidas das estacas encontram-se sumariadas no Quadro 1 (Costa Esteves, 2005).

Com a finalidade de se comprovar as características geométricas das estacas executadas bem como verificar a sua integridade, procedeu-se, após os ensaios de carga, à escavação faseada do terreno envolvido pelo estudo do comportamento das estacas, tanto para sua boa caracterização visual e amostragem sequencial de blocos, como para a remoção daquelas. Tal foi feito até cerca de 6m de profundidade.

Após extracção das estacas, foram medidas as características geométricas relevantes para o presente estudo, depois de devidamente limpas de todo o solo que se encontrava ao longo do fuste, encontrando-se no Quadro 2 as características geométricas visadas inicialmente pelo processo de execução das estacas estudadas (E9, C1 e T1) e a geometria realmente conseguida.

Quadro 1 – Características das estacas.

Função das Estacas (*)	Designação	Tipologia	L (m)	Armadura longitudinal	Armadura transversal	f _{ck} (MPa)	f _{cm} (MPa)
Reacção (tracção)	E1 a E8	moldada	< 12	A500 12φ25	φ12 com passo de 10 cm	27,7	30,9
			12<L<22	A500 6φ25	φ12 com passo de 20 cm		
Compressão (ensaio estático)	E9	moldada	6	A500 12φ25	φ12 com passo de 10 cm	27,7	30,9
Compressão (ensaio estático e dinâmico)	C1 e C2	cravada	6	A400 8φ16	A235 φ6 com passo de 16 cm (**)	45	48
Compressão (ensaio estático e dinâmico)	T1 e T2	trado contínuo	6	A500 12φ25	φ10 com passo de 10 cm	44	52,6

(*) só se assinalam as funções relacionadas com o comportamento estudado à compressão (algumas estacas foram posteriormente sujeitas a acções horizontais)

(**) extremos reforçados com passo de 8 cm

Quadro 2 – Características geométricas das estacas.

Designação	Secção pretendida (mm)	Secção executada (mm)	Comprimento pretendido (m)	Comprimento executado (m)
E9	circular (φ 600)	circular (em média φ 605) (na ponta φ 525)	6	6
C1	quadrada (350x350)	quadrada (350x350)	6	6
T1	circular (φ 600)	circular (φ 611)	6	6

4 – PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DAS ESTACAS

Conforme atrás referido, foi lançado um “exercício internacional de previsão do comportamento de estacas com base em ensaios de caracterização”. Aos participantes foram fornecidas informações sobre a geometria das estacas, o perfil do solo, os equipamentos e os resultados dos ensaios de carga dinâmicos. Foi solicitado aos participantes para apresentarem a previsão do comportamento das estacas incluindo:

- (i) tabela que fornecesse os valores carga versus assentamento na cabeça da estaca;
- (ii) parâmetros e modelos usados na previsão;
- (iii) metodologia de cálculo;
- (iv) resistência lateral e de ponta da estaca, separadamente (quando aplicável);
- (v) capacidade resistente última e critério utilizado para a definir;
- (vi) carga admissível e respectivo factor de segurança;
- (vii) explicação dos métodos utilizados para obter cada um dos pontos mencionados acima.

Este desafio contou com 33 participantes de 17 países, como se pode observar na Figura 4.

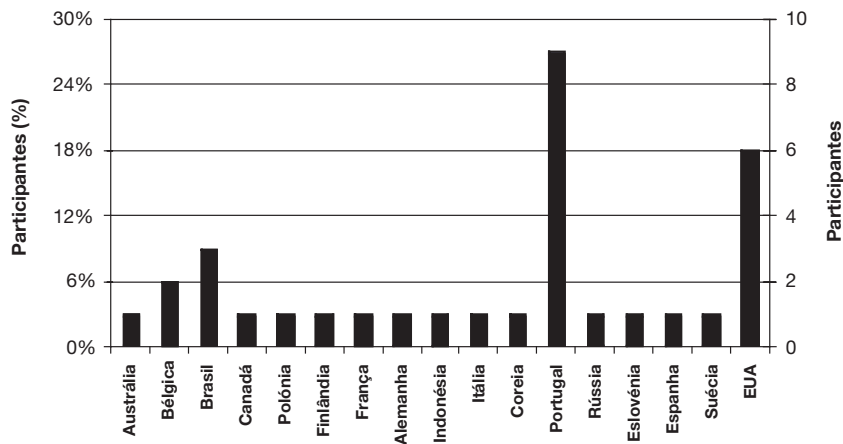


Fig. 4 – Distribuição dos participantes por países.

A compilação das previsões apresentadas pelos participantes no que respeita à capacidade resistente última das estacas E9 (moldada), T1 (CFA) e C1 (cravada), encontra-se resumida nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente. A resistência de ponta (Rb) e a resistência lateral (Rs) estão representadas em separado quando aplicável, quando tal não é possível, representa-se a resistência total (Rt).

Os valores apresentados nas previsões derivam da aplicação de métodos muito distintos, nomeadamente: analíticos ou empíricos, resultados de ensaios dinâmicos ou uma combinação de vários métodos. É também importante salientar que foram utilizados critérios ou aproximações de cálculo diferentes para definição da resistência última (refira-se que está em curso a elaboração de um relatório síntese destes resultados a publicar em monografia).

As previsões apresentadas nas Figuras 5, 6 e 7 revelam grande dispersão, o que demonstra que a avaliação da capacidade resistente última à compressão de uma estaca é ainda uma tarefa difícil, aliás também confirmado no evento 2002 *ASCE GeoInstitute’s Deep Foundation Conference* (Fellenius et al., 2004).

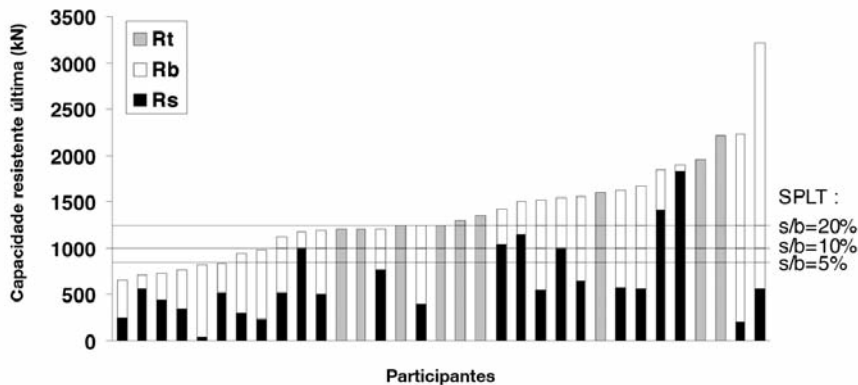


Fig. 5 – Capacidade resistente última: previsão para a estaca moldada E9.

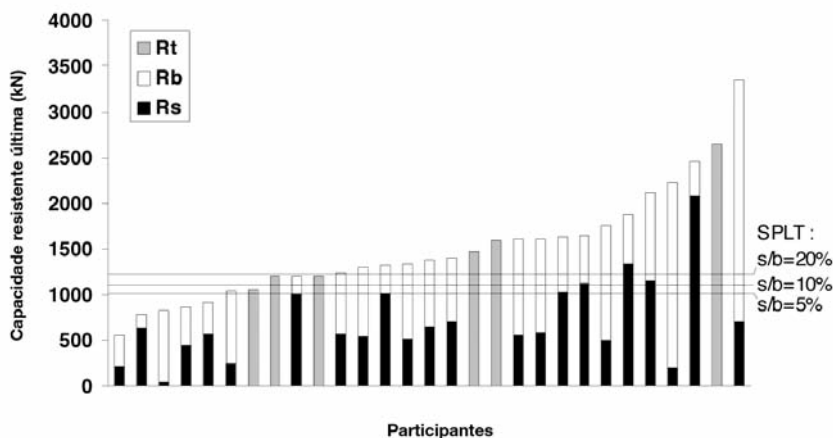


Fig. 6 – Capacidade resistente última: previsão para a estaca CFA T1.

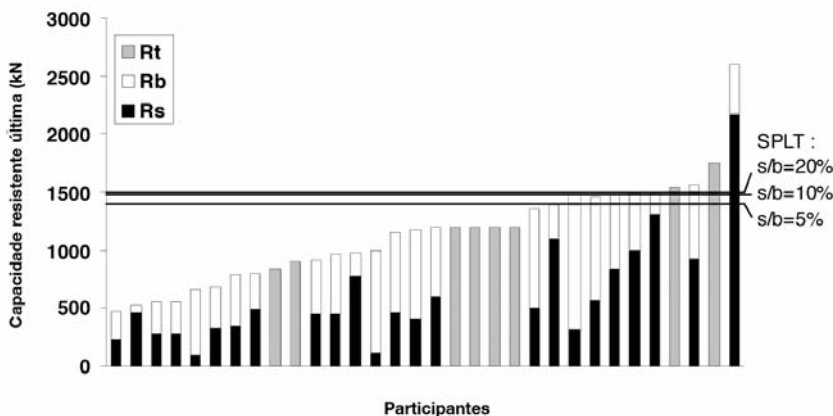


Fig. 7 – Capacidade resistente última: previsão para a estaca cravada C1.

5 – CURVAS CARGA-ASSENTAMENTO

O procedimento seguido nos ensaios de carga verticais estáticos (SPLT) procurou conciliar as recomendações de alguns comités de normalização: a norma Americana ASTM D1143-81, o documento do subcomité Europeu ISSMGE-ERTC3 (De Cock *et al.*, 2003) e a norma Brasileira NBR-12131. O plano de cargas adoptado para cada uma das estacas ensaiadas consistiu em ciclos de carga-descarga, com incrementos iguais e sucessivos, garantindo-se que em cada ciclo de carga-descarga a carga máxima, era mantida até à estabilização dos deslocamentos. Considerou-se que a estabilização dos deslocamentos era verificada para taxas de assentamento inferiores a 0,3 mm/h, com um período mínimo de 30 minutos e máximo de 2 horas na aplicação da carga.

Nas estacas E9 e T1 foram instalados 5 sensores (*retrievable extensometer*) a 5 níveis de profundidade para permitir a medição da resistência mobilizada ao longo do fuste da estaca. Na base da estaca E9 foi colocada uma célula de carga de pressão total com 350mm de diâmetro para

medição da tensão mobilizada na ponta. A célula de carga foi colocada entre dois pratos de aço inoxidável com 450mm de diâmetro selada lateralmente com mastique.

Para comparar as previsões com os resultados obtidos nos ensaios de carga (SPLT), os últimos são referenciados a valores correspondentes a um certo padrão de deslocamento normalizado. Foram considerados três níveis diferentes: $s/b=5\%$, 10% e 20% (s = deslocamento ou assentamento da cabeça da estaca, b = diâmetro ou largura da estaca).

As Figs. 5, 6 e 7 mostram que um número significativo de previsões sobrestimam a capacidade resistente para as estacas E9 e T1, enquanto que as previsões para a estaca C1 são conservativas e 9 delas com valores muito próximos do obtido aquando do ensaio de carga (com uma diferença inferior a 10%).

As curvas carga-assentamento obtidas para as estacas E9, T1 e C1 estão representadas na Figura 8.

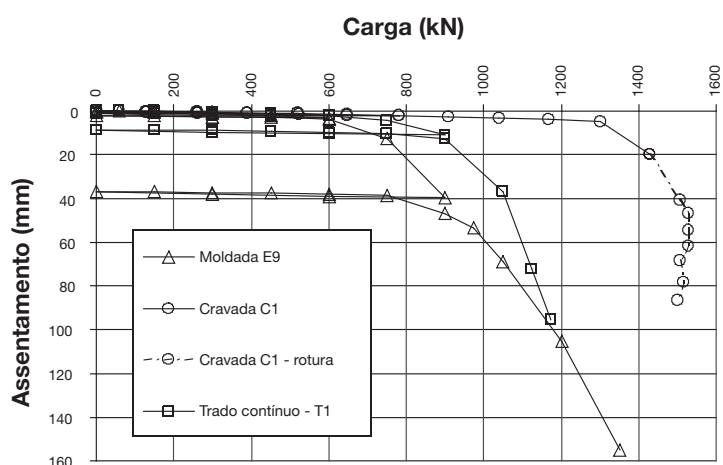


Fig. 8 – Curvas carga-assentamento das estacas ensaiadas.

Embora a estaca C1 tenha uma secção transversal bastante menor ($43,3\%$), ela mostrou um comportamento mais rígido que as outras duas estacas objecto de estudo. Isto é uma indicação clara que os efeitos de instalação desempenham um papel muito relevante no comportamento da estaca. Neste caso, o processo de cravação da estaca terá induzido provavelmente um aumento significativo das tensões horizontais no solo em redor da estaca e um expectável adensamento do solo, embora se admita perda de estrutura relicar.

Através da Figura 8 não se consegue definir com clareza a capacidade resistente última das estacas E9 e T1. Na realidade, os resultados dos ensaios de carga podem ser interpretados de uma forma mais conveniente quando se recorre ao deslocamento ou assentamento normalizado (s/b), que aliás constituem de sobremaneira condições limites em projecto de estruturas.

A Figura 9 representa a curva carga-assentamento normalizado da estaca C1. A capacidade resistente última foi atingida para um assentamento normalizado de cerca de 10% . Este valor está em consonância com resultados recentes de ensaios de estacas de deslocamento em areias, recorrendo à modelação física com centrifugadora (Fioravante et al., 1995).

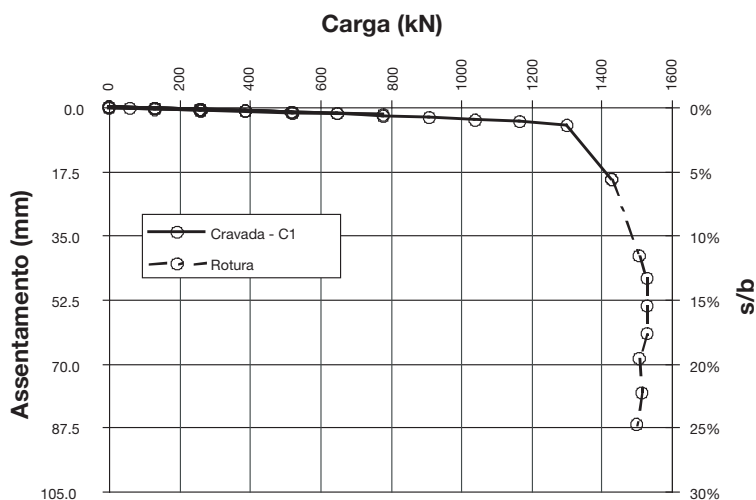


Fig. 9 – Curvas carga-assentamento das estacas ensaiadas.

Os resultados das estacas E9 e T1 são representados na Figura 10.

Neste caso, não se verifica o esgotamento da capacidade resistente do solo, mesmo para um assentamento normalizado de 25%.

Para avaliar a evolução da carga mobilizada na ponta na estaca E9, recorreu-se às medições da célula de carga instalada na base da estaca. A conversão do valor da pressão medida na célula para a carga instalada na ponta implica a consideração de algumas hipóteses simplificadoras cuja validade é questionável. Deste modo, optou-se por considerar duas hipóteses extremas:

Hipótese 1 – Diâmetro da ponta (Db) igual a 350mm;

Hipótese 2 – Diâmetro da ponta (Db) igual a 525mm.

A evolução das resistências lateral e de ponta para as duas hipóteses referidas é apresentada nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Neste trabalho considerou-se que a diferença entre a carga medida no topo e a carga instalada na ponta permite determinar a resistência lateral mobilizada. As medições obtidas ao longo do fuste da estaca através da instrumentação interna (*retrievable extensometer*) serão objecto de uma análise específica a apresentar em trabalho futuro.

Como seria de esperar, as hipóteses 1 e 2 conduzem a valores bastante distintos no que respeita às resistências mobilizadas. No entanto, não invalidam as constatações seguintes:

- i) a resistência lateral máxima é atingida para um assentamento normalizado de cerca de 10%;
- ii) não se verifica o esgotamento da resistência de ponta.

A estaca T1 apresenta um comportamento similar à estaca E9.

Estes resultados estão igualmente de acordo com os estudos de modelação física com centrífuga de estacas sem deslocamento em areias (Fioravante *et al.*, 1995), que mostram, efectivamente, ser necessário níveis de assentamento normalizado muito elevados para conseguir esgotar a resistência de ponta ($s/b \geq 100\%$).

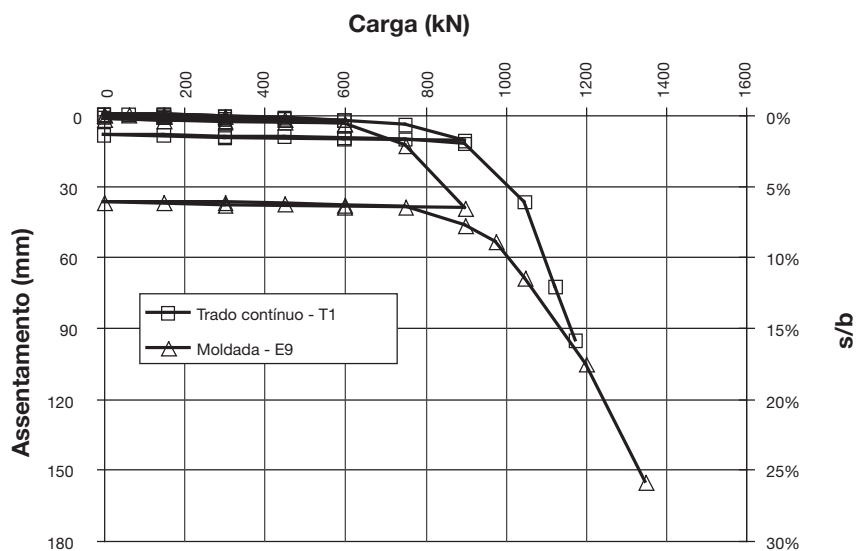


Fig. 10 – Curva carga-assentamento normalizado: estacas E9 e T1.

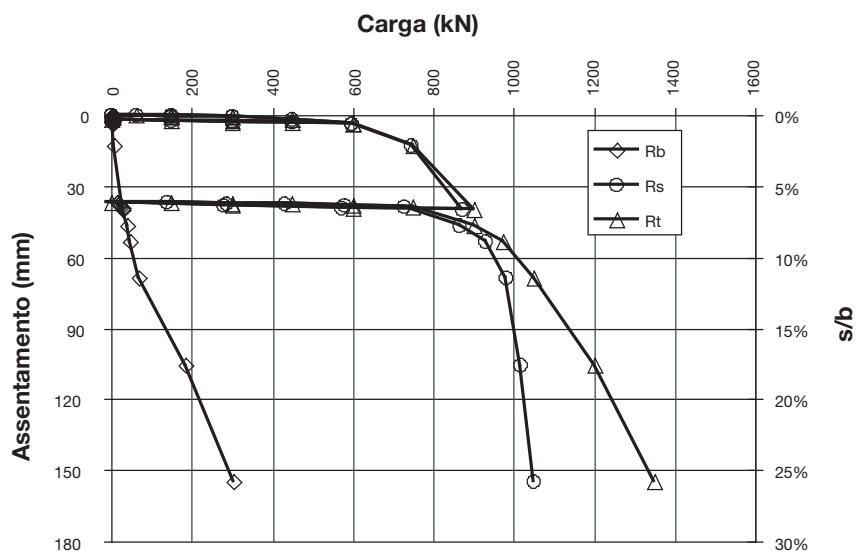


Fig. 11 – Mobilização das resistências lateral e de ponta na estaca E9. Hip. 1: $D_b=350\text{mm}$.

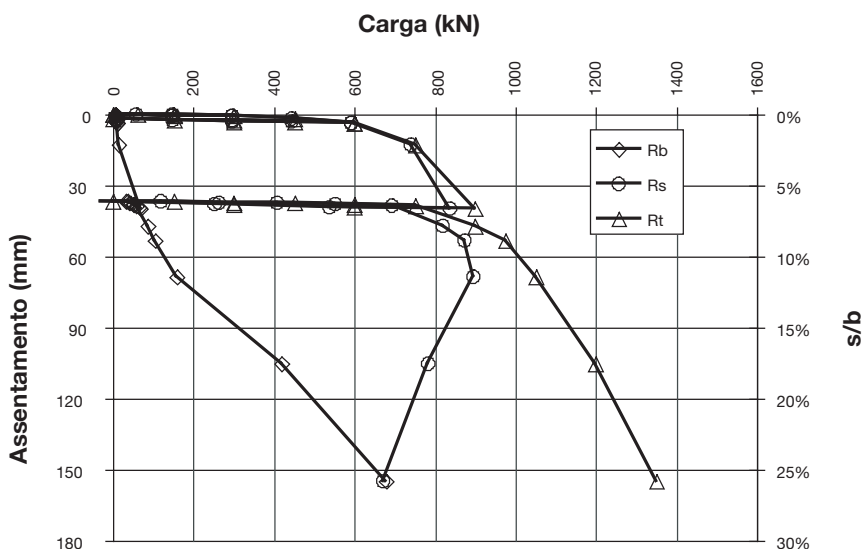


Fig. 12 – Mobilização das resistências lateral e de ponta na estaca E9. Hip. 2: Db=525mm.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No âmbito de um projecto de investigação sobre o comportamento de estacas em solos residuais, foi desenvolvido um campo experimental nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Através dos resultados dos ensaios de carga foi possível evidenciar a importância dos efeitos de instalação no desempenho das estacas sob acções verticais.

Foi lançado um exercício internacional de previsão do comportamento das estacas do campo experimental. De uma forma geral, as previsões sobrestimaram a capacidade resistente das estacas sem deslocamento (estaca moldada e estaca de trado contínuo), porque os assentamentos induzidos nos ensaios de carga estáticos não permitiram a total mobilização da resistência de ponta. Pelo contrário, as previsões sobre a estaca cravada foram conservativas, isto é, houve uma subestimação dos ganhos de resistência induzidos pela instalação da estaca.

O comportamento das estacas do campo experimental, em solo residual do granito, no que respeita à relação carga-assentamento normalizado, é aparentemente bastante similar ao das estacas em solos arenosos.

7 – AGRADECIMENTOS

Muito especiais e gerais às empresas que permitiram este trabalho (Mota-Engil, SA – Direcções de Fundações Especiais e de Geotecnia; Teixeira Duarte S.A.; Sopecate, S.A.; e Tecnasol FGE, S.A.) e particulares ao Eng. Ricardo de Andrade e ao Eng. Nuno Cruz, e também um reconhecimento à FEUP, à reitoria da Universidade do Porto, à 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 e do ICIST do IST, centros da Fundação para a Ciência e Tecnologia do MCES.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D1143–81 (reapproved 1994). *Standard test method for piles under static axial compressive load*. Annual Book of American Society for Testing and Materials, 11p.
- Costa Esteves, E.F.M. (2005). *Ensaios e análise de resposta de estacas em solo residual do granito sob acções verticais*. Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- De Cock, F., Legrand, C., & Huybrechts, N. (2003). *Axial static pile load test in compression or in tension*. Recommendations from ERTC3-Piles, ISSMGE Subcommittee. Proc. XIII ECSMGE, Prague, vol. 3, 717-741.
- Fellenius, B.H., Hussein, M., Mayne, P. & McGillivray, R.T. (2004). *Murphy's law and the pile prediction event at the 2002 ASCE Geoinstitute's Deep Foundation Conference*. Proc. DFI 29th Annual Conference on Deep Foundations, Vancouver, 29-43.
- Fioravante, V., Ghionna, V.N., Jamiolkowski, M. & Pedroni, S. (1995). *Load carrying capacity of large diameter bored piles in sand and gravel*. Tenth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Beijing.
- NBR-12131 (1991). *Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Viana da Fonseca, A. e Ferreira, C. (2002). *Aplicação da técnica de bender elements para avaliação da qualidade de amostragem em solos residuais*. Actas do XII COBRAMSEG, Vol.1, ABMS, São Paulo, Brasil, pp.187-199.
- Viana da Fonseca, A., Carvalho, J., Ferreira, C., Tuna, C., Costa, E. & Santos, J. (2004). *Geotechnical characterization of a residual soil profile: the ISC'2 experimental site*. Geotech. & Geophysical Site Charact. Ed.Viana da Fonseca & P.W.Mayne. Millpress, Rotterdam, vol. 2, 1361-1369.
- Viana da Fonseca, A., Carvalho, J., Ferreira, C., Santos, J. A., Almeida, F., Pereira, E., Feliciano, J., Grade, J. & Oliveira, A. (2006). *Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing technique*. Submetido e aceite em Junho de 2005 a "Geotechnical and Geological Engineering", International Journal of Springer Netherlands - ex-Kluwer (ISSN: 0960-3182) - Pub.: Mar 2006.