

# DEFINIÇÃO DE CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA DE ESTACAS EM SOLO RESIDUAL DE GRANITO

Definition of load transfer curves of piles in granitic residual soil

David Jorge da Rocha Pereira Fernandes\*

António Viana da Fonseca\*\*

**RESUMO** – O subsolo do Noroeste de Portugal, em particular o da cidade do Porto, é composto principalmente por solos residuais do granito, caracterizados pela sua forte heterogeneidade. Devido aos desenvolvimentos dos métodos construtivos, a utilização de estacas tem sido cada vez mais frequente neste tipo de solos, pelo que se torna imperativo conhecer melhor o comportamento deste tipo de fundação, que ainda hoje não é consensual. Uma forma simplificada, mas ao mesmo tempo eficaz, de analisar a interação entre as estacas e maciço ao longo da face lateral e na ponta da estaca é através do conhecimento dos padrões de transferência de carga ao longo do fuste e da base, vulgarmente conhecidas como curvas ‘t-z’ e ‘q-z’, respetivamente. Tendo em conta a problemática das cargas residuais, é o objetivo deste trabalho apresentar metodologias fundamentadas para a definição das curvas que caracterizam o comportamento de três tipos de estacas que foram utilizados neste tipo de solo, também considerando o efeito das cargas residuais. Para simular essas curvas recorreu-se ao programa *UniPile*<sup>®</sup> da *UniSoft*, que é uma ferramenta especificamente desenvolvida para este fim. Espera-se que este estudo forneça informação prática útil, permitindo o dimensionamento seguro mas eficaz das estacas construídas neste tipo de solo, tendo em conta os diversos fatores que influenciam o seu comportamento.

**SYNOPSIS** – The subsurface of North-Western Portugal, in particular the city of Oporto, is composed mainly of granite residual soil, characterized by its strong heterogeneity. Due to developments in construction, the use of piles has been increasingly frequent in this type of soil. Therefore, it becomes imperative the knowledge of the behaviour of this type of foundation that, even today, is not consensual. A simplified method, but also effective, is to analyse the stress-strain behaviour along the shaft interface and in the bottom (toe) support by recurring to load-transfer curves, commonly known as ‘t-z’ and ‘q-z’, respectively. Given the problem of residual loads, it is the objective of this study to show the possibilities based on the definition of the curves that characterize the behaviour of three types of pile in this type of soil, also considering the effect of the residual load. To simulate these curves a very comprehensive commercial program, *UniPile*<sup>®</sup> of *Unisoft*, has been used. It is hoped that this study provides practical and very useful information for a more effective but also safer design of piles in this type of soil, taking into account the different factors that influence their behaviour.

**PALAVRAS CHAVE** – Transferência de carga, fundações indiretas, cargas residuais, modelação em solo residual.

## 1 – INTRODUÇÃO

De entre os métodos de análise para previsão/modelação de curvas de carga-assentamento, até à rotura, de estacas isoladas submetidas a esforços de compressão, há os que – recorrendo a méto-

---

\* Engenheiro Civil. E-mail: david.jorge.fernandes@gmail.com

\*\* Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. E-mail: viana@fe.up.pt

dos numéricos – se baseiam em curvas da transferência de carga, ‘t-z’ e ‘q-z’, que relacionam tensões de corte ao longo do fuste, com deslocamentos ao longo da estaca (definidas através de molas não lineares independentes), e na ponta ou base da estaca, respetivamente. Por serem versáteis e não exigirem meios computacionais particularmente complexos, são mais universais, desde que as leis sejam representativas dos solos em apreço e das condições de interface geradas em cada método construtivo específico.

A execução de estacas de três tipologias de métodos construtivos num perfil de solo residual (saprolítico) do granito no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (CEFEUP), que foram sujeitas a carregamentos verticais e horizontais, para desenvolvimento das análises do *International Prediction Event (Class A)* - exercício internacional de previsão do comportamento de estacas com base em ensaios de caracterização, permitiu recolher um acervo de resultados que tem vindo a ser objeto de análises muito inovadoras e de grande impacto.

Uma das análises possíveis é a de estudar e sistematizar um conjunto de curvas mais ajustadas às três tipologias construtivas estudadas, e que são as mais usadas pela nossa indústria de fundações especiais (estacas moldadas com tubo recuperado, estacas de trado contínuo – CFA – e estacas prefabricadas cravadas dinamicamente). Estas curvas podem ser definidas através de retroanálises, recorrendo a um programa de cálculo pelo MEF.

Assim, este trabalho foca três aspetos essenciais no estudo do comportamento de estacas: a resposta a carregamentos estáticos, a transferência de carga estaca-solo-estaca e a problemática da influência das cargas residuais instaladas no processo de instalação. Estas questões vão ser, numa primeira fase, abordadas de modo a entender a metodologia aplicada e posteriormente serão aplicadas aos três tipos de estacas ensaiadas no CEFEUP: cravadas, moldadas com recurso a tubo moldador recuperado e de trado contínuo (CFA).

## 2 – METODOLOGIA APLICADA

### 2.1 – Análise da resposta a carregamentos estáticos

Esta análise adequa-se bastante bem ao tipo de solo analisado pois este comporta-se genericamente em condições drenadas quando carregado, recaindo assim numa análise em tensões efetivas. Assim, para se chegar à capacidade de carga da estaca é necessário obter as resistências tanto do fuste, como da ponta. Da soma destas duas componentes obtém-se a resistência última da estaca.

A resistência lateral última da estaca é um fenómeno bem definido. O método que vai ser descrito de seguida, conhecido como o método  $\beta$ , considera o ângulo de atrito, o coeficiente de impulso em repouso do solo ou a textura do fuste da estaca, como parâmetros essenciais de cálculo direto da resistência do fuste. Assim, surge o coeficiente de proporcionalidade  $\beta$  (que incorpora os parâmetros anteriormente descritos) para relacionar essa resistência com a tensão efetiva vertical. Este coeficiente é obtido de forma empírica e num caso específico, como é o caso de maciços de solos residuais – insuficientemente estudados neste âmbito – e para tecnologias de estacas particulares, não é fácil de definir.

Assim, a expressão que traduz o valor de cálculo da resistência total do fuste,  $R_s$ , para o comprimento útil (enterrado) da estaca, é:

$$R_s = \int A_s f_s dz = \int A_s (c' + \beta \sigma'_z) dz \quad (1)$$

$A_s$  – área do fuste à profundidade  $z$ ;

$f_s$  – resistência unitária do fuste;

$c'$  – coesão efetiva;

$\beta$  – coeficiente (tipo Bjerrum – Burland);

$\sigma'_z$  – tensão efetiva vertical.

Já a resistência última de ponta, ao contrário da resistência lateral última, não é fácil de definir. Logo à partida depara-se com uma dificuldade que é o facto daquela, na prática, não ser uma realidade, por não se atingir um limite a não ser para grandes deformações. “Esta resistência segue um caminho mais ou menos curvo que não apresenta um valor de pico” (Fellenius *et al.*, 2006) e está intimamente relacionada com o movimento da ponta da estaca formada pela chamada curva ‘q-z’.

No entanto, nos ensaios de carga axial estáticos pode surgir um valor de pico claro, que pode ser tomado como a capacidade da estaca e que pode ser devido à possibilidade de haver:

- uma resistência de ponta mínima;
- um encurtamento da estaca devido ao aumento da carga depois de a resistência lateral ter sido mobilizada na totalidade;
- uma diminuição da resistência lateral após atingir o seu máximo;
- a presença de cargas residuais que resultem do processo de instalação.

O método utilizado para estimar esta resistência, à semelhança do anterior, também utiliza um coeficiente de proporcionalidade para definir a grandeza em função da tensão efetiva.

Assim a resistência total da ponta da estaca é obtida através da seguinte expressão:

$$R_t = A_t q_t = A_t N_t \sigma'_{z=D} \quad (2)$$

$A_t$  – área na base da estaca;  
 $q_t$  – resistência unitária da ponta;  
 $N_t$  – coeficiente de resistência de ponta;  
 $D$  – profundidade de incrustação;  
 $\sigma'_z$  – tensão efetiva na base.

## 2.2 – Transferência de carga

Este método permite que estacas isoladas sujeitas a cargas axiais possam ser tratadas como elementos unidimensionais tipo pilares em que um conjunto de molas verticais tem a finalidade de representar a rigidez axial da estaca e a interação desta com o solo. Para tal é necessário subdividir a estaca num número discreto de segmentos que estão unidos por molas que representam a rigidez axial da estaca. Cada um destes segmentos encontra-se ligado lateralmente a uma mola vertical que representa a resistência ao corte do solo envolvente. A resistência última da mola é uma função da interface entre o solo e a estaca, sendo habitualmente denominada de resistência lateral no dimensionamento de fundações profundas. O último segmento, no fundo, é também suportado por uma mola vertical que representa a resistência de ponta da estaca. A discretização assumida na aplicação deste método é mostrada esquematicamente na Figura 1.

Este processo permite obter, de forma iterativa, a curva de carga-assentamento através do cálculo inverso da carga que pode ser aplicada na cabeça da estaca. Isto possibilita, a cada passo, o desenvolvimento do assentamento esperado na ponta da estaca. Para cada iteração o equilíbrio vertical das forças representadas tem de ser garantido, incluindo as forças ao longo do fuste, que resultam do sistema de molas não linear, e a força na ponta da estaca, que resulta, por sua vez, da mola representativa dessa resistência. O deslocamento da cabeça da estaca é calculado para cada passo assumindo o deslocamento de cada segmento, o deslocamento assumido para a ponta da estaca (correspondente ao passo) e a deformação elástica de cada segmento (Coyle e Reese, 1966; Poulos e Davis, 1980).

“A aproximação por este método oferece uma grande flexibilidade no tratamento de solos não homogêneos e pode ser usado, em conjunto com uma função numérica apropriada, para modelar o comportamento visco-elástico do solo” (Guo, 1996).

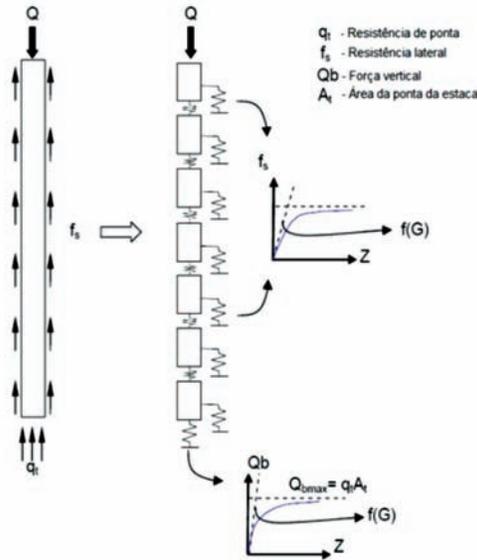


Fig. 1 – Discretização do Método da Transferência de Carga (modificado de Ruiz, 2005).

Como pode ser observado na Figura 1, o método descrito é, atualmente, baseado em dois tipos de funções de transferência de carga:

- as chamadas curvas ‘t-z’ que caracterizam a transferência de carga entre o fuste e o solo e as quais são atribuídas às molas laterais do modelo;
- a denominada curva ‘q-z’ que traduz a força na base da estaca em relação ao assentamento da mesma e a qual é atribuída à mola que está localizada na ponta da estaca.

Estas curvas são altamente dependentes do tipo de solo em que a estaca foi executada, do tipo de execução da mesma estaca e do tipo de carregamento a que esta vai estar sujeita.

De modo a simular a curva de carga-assentamento correspondente a um ensaio de carga estático, torna-se necessário introduzir no programa *UniPile*<sup>®</sup> (Fellenius e Goudreault, 1998) as curvas de transferência de carga ‘t-z’ e ‘q-z’, correspondentes ao fuste e à ponta, respetivamente.

O programa permite obter as curvas de duas formas distintas:

- do tipo “função”, por uma função exponencial (Figura 2a);
- do tipo “personalizada”, pela introdução de cinco pontos (Figura 2b).

Cada curva de transferência de carga do tipo exponencial (Figura 2a) é definida pela razão da resistência mobilizada pela resistência última, como função do movimento. Para tal é necessário introduzir o movimento para o qual a resistência última é mobilizada e um expoente. A equação que rege as curvas deste tipo é a seguinte:

$$\frac{R_{MOB}}{R_{ULT}} = \left( \frac{\delta_{MOB}}{\delta_{ULT}} \right)^e \quad (3)$$

$R_{MOB}$  – resistência mobilizada;

$R_{ULT}$  – resistência última;

$\delta_{MOB}$  – deslocamento mobilizado;

$\delta_{ULT}$  – deslocamento último;

$e$  – coeficiente de proporcionalidade.

Já nas curvas do tipo “personalizado” (Figura 2b) é introduzido para cada um dos cinco pontos a percentagem da resistência mobilizada e o respetivo movimento.

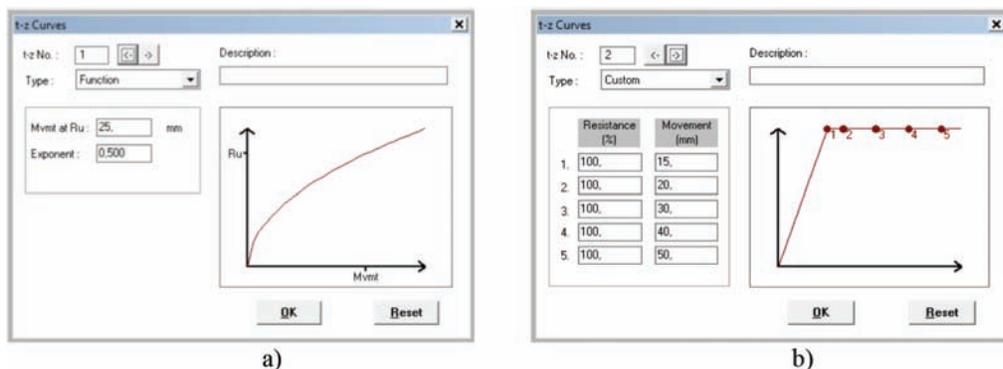


Fig. 2 – Tipos de curvas de transferência de carga no programa UniPile: a) exponencial; b) personalizada.

### 2.3 – Carga residual

Nos ensaios de carga estáticos realizados no campo experimental, os extensómetros foram colocados após a instalação das estacas e calibrados para iniciar a medição no momento em que se começou o ensaio.

A consequência deste procedimento é que as cargas medidas ao longo da estaca não representam as verdadeiras cargas, uma vez que não consideram as cargas de interação instaladas aquando da colocação das estacas no terreno, comumente designadas cargas residuais. Estas cargas residuais têm uma influência considerável no mecanismo de transferência de carga. No entanto, a dificuldade que existe na sua quantificação e distribuição ao longo da estaca levou a que, ao longo do tempo, fosse menosprezada a sua existência, dando origem a conceitos errados e interpretações falaciosas.

Durante décadas, a interpretação do mecanismo de transferência de carga foi feita de forma errada. Existia uma discrepância entre os resultados dos ensaios experimentais e os teóricos que durante muito tempo não tinha explicação.

Esta diferença prendia-se com o facto de os resultados experimentais mostrarem um andamento da função de transferência de carga em profundidade do tipo cúbico e não parabólico, como apresentavam os modelos teóricos. Da mesma forma o atrito lateral unitário associado deveria mostrar uma evolução linear em profundidade uma vez que seria (pelo menos em solos homogéneos) governado por tensões efetivas aproximadamente linearmente crescentes.

A razão subjacente a esta interpretação errónea prende-se com o facto de, no ensaio de carga estático, durante muito tempo, os assentamentos da estaca apenas serem medidos na cabeça da mesma, o que não permitia a aferição desta evolução. Mesmo quando se começou a instrumentar o fuste, os extensómetros eram zerados antes do início do ensaio, ou seja, as medições começavam com o valor zero, no entanto já existia uma carga instalada na estaca, associada a uma compressão da mesma, dispendo ao longo do fuste de um equilíbrio de forças de levantamento (uma carga de levantamento atuando na base da estaca, acrescida de uma carga na zona mais baixa do fuste com o terreno, a levantar a estaca) e de reação ao mesmo, na parte superior do fuste (Figura 3).

Designa-se por carga residual o valor da reação na ponta e da parte mais baixa do fuste, onde o terreno atua com forças ascendentes, estando presente em estacas que no processo de instalação criam essas forças de “engajamento”. À luz da proposta de Massad (1995), esta carga de ponta será

aqui designada por  $P_h$  e junta-se ao atrito lateral positivo ( $Al$ ), que poderá existir na parte inferior da estaca, sendo o conjunto equilibrado pelo atrito lateral negativo ( $ar$ ) existente na parte superior da estaca. Na Figura 3 de Fellenius (2002) apresenta-se o desenvolvimento teórico da transferência de carga numa estaca em que estejam presentes cargas residuais, permitindo uma melhor interpretação das forças em jogo. Encontra-se também representado o sistema de forças associado à atuação de uma carga  $P_o$ . Verifica-se que a reação da ponta gerada, que corresponde agora à soma da carga residual com o acréscimo de reação de ponta ( $Q_p'$ ) quando se impõe novas cargas, se desenvolve até se gerar o atrito lateral positivo ao longo da estaca, revertendo a carga residual existente no fuste. Associado à carga residual ao longo do fuste, existe o plano neutro. Este plano define a zona de transição do sentido das cargas residuais ao longo da estaca, situando-se normalmente entre  $1/3$  e  $1/2$  da altura da estaca, evoluindo a sua localização à medida que se aumenta o carregamento, até, naturalmente, coincidir com a ponta/base da estaca.

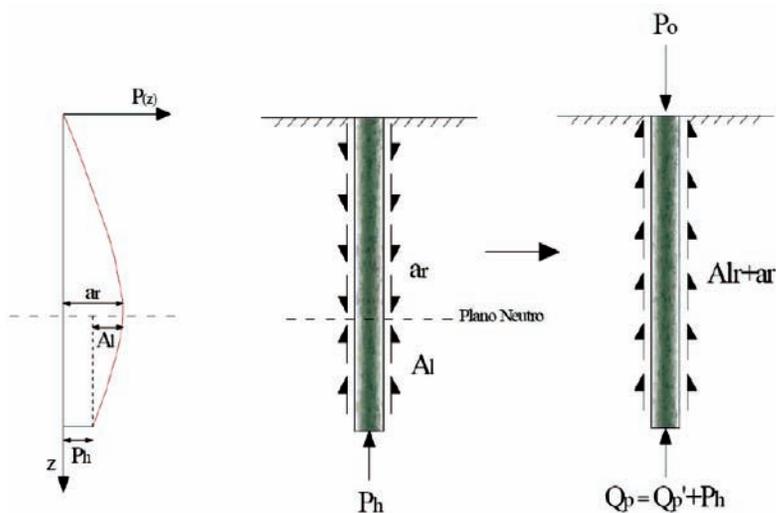


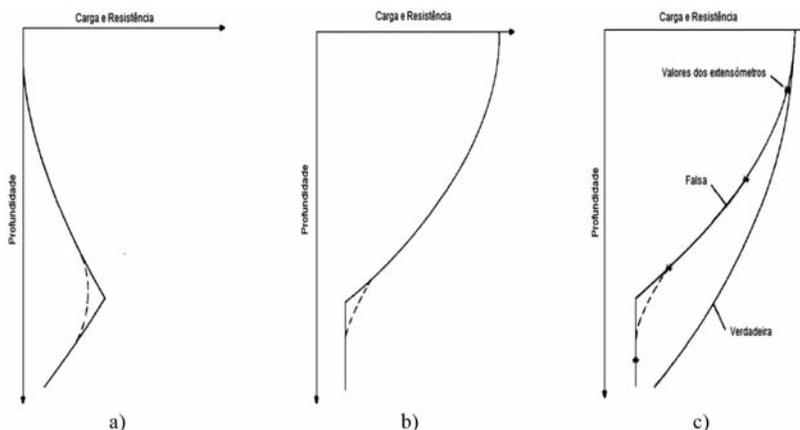
Fig. 3 – Desenvolvimento teórico em profundidade da carga residual (Fellenius, 2002).

Como já foi referido, a existência desta carga leva a que a interpretação dos resultados extraídos dos extensómetros seja falseada. De modo a melhor se compreender a sua influência é aqui descrito um caso prático, considerando uma estaca sujeita a um ensaio de carga estático, em que é mobilizada a totalidade da resistência lateral e na qual está presente a carga residual representada na Figura 4a. Os extensómetros foram ativados após a instalação da estaca e calibrados de modo a obter um valor nulo na primeira medição. Dos resultados extraídos obtém-se uma curva semelhante à representada na Figura 4b. Pode observar-se que nas condições indicadas a partir de determinada profundidade, os extensómetros não registam a existência de resistência no fuste. Este ponto indica a localização do plano neutro, ou seja, o nível em profundidade onde há inversão do sentido das cargas residuais. Este ponto poderá eventualmente estar camuflado, pois a transição pode ser feita de forma suavizada. Da soma destas duas curvas obtém-se a curva correspondente à verdadeira resistência, representada na Figura 4c. Essa curva representa o que realmente se passa ao nível da transferência de carga na estaca.

Conclui-se então que a não consideração da carga residual numa estaca em que esta exista, leva a que a resistência lateral seja sobrestimada e a resistência de ponta subestimada. A existência da carga residual torna o comportamento da estaca aparentemente mais flexível, na medida em que a resistência lateral é maior que a real, contrariamente à resistência de ponta.

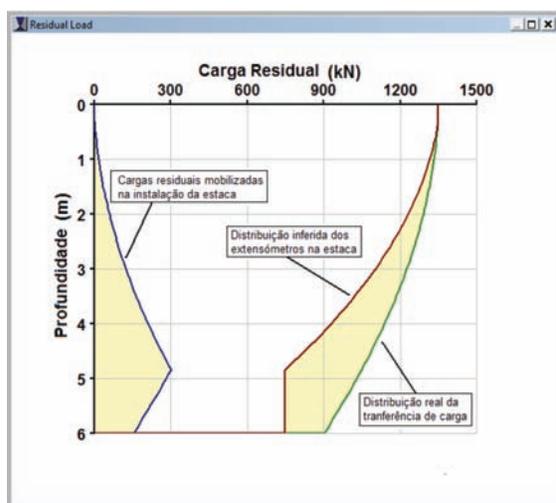
As consequências de uma falha na interpretação dos resultados do ensaio de carga estático para o projeto geotécnico podem ser mais ou menos gravosas de acordo com os objetivos do projetista.

Classicamente, apareceu o conceito de “profundidade crítica”, que nasceu devido às leituras extraídas diretamente dos extensômetros inflitem a tendência de variação, como se pode observar na Figura 4b, diminuindo até a um ponto a partir do qual deixaria de se mobilizar resistência lateral, coincidindo com o plano neutro. Esta interpretação incorreta, levava a que se considerasse o comprimento da estaca apenas até essa profundidade e que a construção abaixo desse ponto apenas traria encargos com material e mão de obra. Tal é absolutamente irrealista e pode levar ao subdimensionamento da fundação.



**Fig. 4** – Transferência de carga considerando a carga residual: a) carga residual; b) falsa distribuição (extraída diretamente dos extensômetros); c) verdadeira distribuição (adaptado de Fellenius e Altaee, 1995).

Relativamente a inserção das cargas residuais no programa *UniPile*<sup>®</sup>, esta é feita sob a forma de uma percentagem da resistência de ponta. Existe portanto uma exigência prévia ao utilizador que é avaliar corretamente qual a magnitude deste tipo de cargas. Da simulação da carga residual, obtêm-se as distribuições representadas na Figura 5.



**Fig. 5** – Simulação das resistências de uma estaca usando o programa *UniPile*<sup>®</sup>.

Esta distribuição é considerada assumindo o pressuposto de que a resistência lateral ao longo da estaca é totalmente mobilizada na rotura, mas que só atua na parte superior da estaca, ou seja, iguala a resistência lateral positiva mobilizada pela carga aplicada no ensaio. Isto leva a que a carga medida nos extensómetros não se altere abaixo do ponto de equilíbrio das cargas residuais, implicando a ausência de resistência lateral nos resultados correspondentes aos medidos através dessa monitorização (falsa resistência nula). Até esse ponto, a carga residual é igual a metade da resistência lateral mobilizada. No entanto, esta situação pode não se verificar em toda a extensão da estaca. Para esses casos Fellenius aconselha a determinar o coeficiente  $\beta$  correspondente à verdadeira distribuição e a simulá-la. A carga residual resulta da diferença entre os resultados dos extensómetros e essa distribuição encontrada. Como este caso não é posto em questão neste trabalho, remete-se a sua pormenorização para o trabalho de Fellenius (2009).

Consequentemente, na análise dos assentamentos que ocorrem numa estaca em que estão presentes cargas residuais, verifica-se que estes são inferiores ao que se verificaria caso esta carga de instalação não existisse (Vesic, 1977). Verifica-se uma diminuição do encurtamento elástico tal como do deslocamento da ponta da estaca, conduzindo a um menor assentamento da cabeça da estaca. A Figura 6 mostra as curvas de transferência de carga no caso de existir ou não carga residual para uma mesma estaca. Pode-se verificar que para cada valor de carga aplicada ( $P_i$ ), os assentamentos associados são maiores no caso em que a carga residual está ausente. Mais ainda, é possível averiguar que a carga de rotura, se definida com uma limitação de assentamento admissível, é maior no caso em que estão presentes as cargas residuais.

Conclui-se portanto que a consideração da presença das cargas residuais é sempre benéfica em termos da avaliação da resistência por critérios de limites de deformação, sendo exclusivamente necessários alguns cuidados na interpretação de provas de carga onde esta esteja presente, de modo a estimar corretamente as componentes de resistência lateral e de ponta.

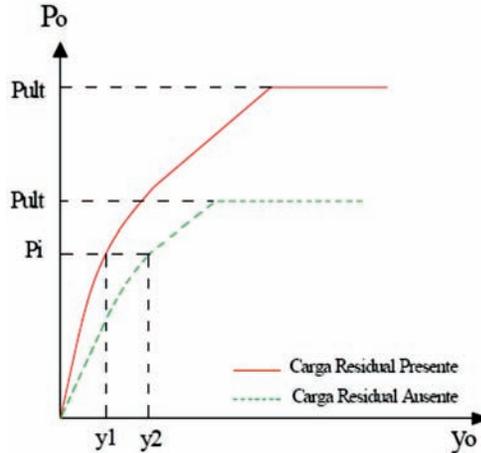


Fig. 6 – Comparação de curvas de transferência de carga na cabeça da estaca no caso de existir ou não carga residual, para uma mesma estaca.

### 3 – CAMPO EXPERIMENTAL FEUP/ISC'2

O Campo Experimental que, em 2003, foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e que se enquadrou na “2<sup>nd</sup> International Site Characterization Conference” ([www.fe.up.pt/isc-2/](http://www.fe.up.pt/isc-2/)), realizada no ano seguinte tem sido amplamente estudado e existem publicações de referência sobre o mesmo.

Uma vez que não é objetivo deste trabalho realizar um estudo geológico-geotécnico sobre o solo residual de granito, remete-se esta análise para as publicações de Viana da Fonseca (1996; 2003), Viana da Fonseca *et al.* (2004), Costa Esteves (2005), Sousa (2006) e Fernandes (2010).

As estacas usadas neste estudo são de três tipos: (i) uma estaca pré-fabricada de betão pré-esforçado com secção quadrada (350×350 mm<sup>2</sup>), comprimento igual a 6,0 m e cravada dinamicamente (será analisada a estaca designada por C1); (ii) estaca moldada (escavada) com recurso a vara *kelly* e tubo metálico, recuperado no decurso da betonagem (com designação E9), de secção circular (φ600 mm) e comprimento igual a 6,0 m; e, (iii) estaca de trado oco contínuo com betão sob pressão, vulgo CFA (estaca estudada designada por T1), também com secção circular (φ600 mm) e comprimento igual a 6,0 m - detalhe em Viana da Fonseca e Santos (2008).

#### 4 – ANÁLISES PARAMÉTRICAS COM O PROGRAMA UNIPILE®

Nesta fase vão ser descritas as análises feitas com o programa *UniPile*®, efetuadas para cada estaca, que permitiram obter as curvas de transferência de carga do fuste e de ponta, consoante a tipologia de construção.

##### 4.1 – Estaca pré-fabricada cravada

A análise da estaca cravada (C1) foi a que se revestiu de um maior grau de incerteza pelo facto de não ter sido possível instrumentar esta estaca. A inexistência de extensómetros ao longo da estaca não permite, por um lado, determinar explicitamente a distribuição da capacidade de carga e, por outro lado, determinar as curvas de transferência de carga referentes ao fuste e à ponta com rigor, pelo que a simulação sem ter em conta as cargas residuais toma especial relevância, uma vez que vai permitir encontrar as prováveis curvas de transferência de carga que posteriormente seriam comparadas com as curvas em que as cargas residuais já são tidas em consideração.

Numa primeira fase considerou-se que a distribuição das forças mobilizadas para carga última (limite correspondente à “capacidade de carga”) ao longo do fuste é linear e equivale a 122 kPa, ou seja, a resistência total do fuste é igual a 1016 kN. Esta hipótese extrema já tinha sido analisada em Viana da Fonseca *et al.* (2007) e tinha indicado hipoteticamente a inexistência de carga residual. Isto pode ser visto na Figura 7a, na qual a curva correspondente à ‘falsa’ simulação apresenta precisamente o desenvolvimento da resposta para a carga última para as condições referidas. Neste

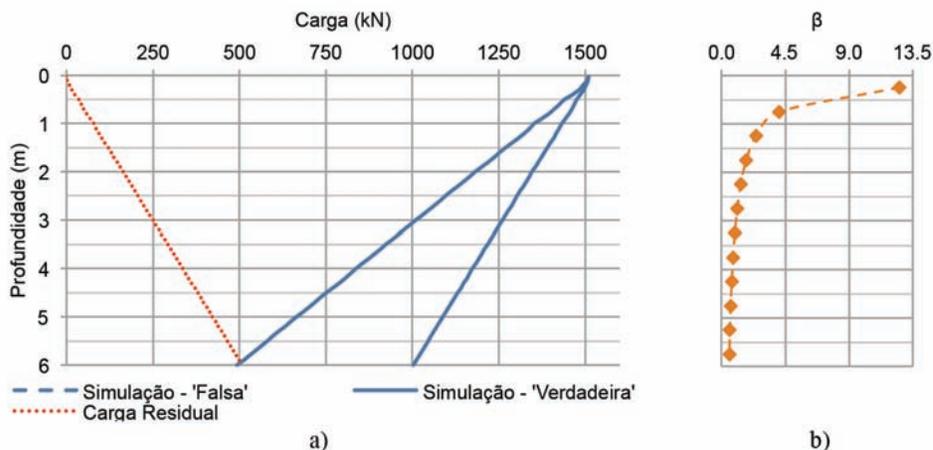


Fig. 7 – Simulação da capacidade de carga da estaca cravada C1: a) linear; b) coeficiente de atrito lateral unitário.

caso, observou-se que o valor de  $\beta$  diminui com a profundidade mas apresenta-se inaceitavelmente muito elevado à superfície. Relativamente à ponta, o valor de 494 kN corresponde a um valor do parâmetro  $N_i$  igual a 36.

Admitiu-se, então, à semelhança do que já havia sido feito em Viana da Fonseca *et al.* (2007), que a carga residual assumia o valor de 510 kN, estimado pela aplicação do método das duas retas modificado (Massad, 1992, 1993) obtendo-se a ‘verdadeira’ curva de capacidade de carga apresentada na Figura 7a e a respetiva evolução do coeficiente  $\beta$  em profundidade (Figura 7b).

Esta simulação aponta para uma resistência lateral unitária e um coeficiente  $N_i$  iguais a 45 kPa e 73, respetivamente. A carga residual foi simulada como uma percentagem da resistência encontrada para a ponta, igual a 51%. Verifica-se também que não existe ponto de transição do sentido das cargas residuais ao longo do fuste. Assim, em termos das cargas residuais, todo o fuste contraria a carga residual de ponta.

Outra possibilidade para a evolução da distribuição das forças para a carga última baseia-se na possibilidade de haver um desenvolvimento crescente da resistência lateral unitária em profundidade, de onde se obtém a evolução ‘falsa’ da distribuição das forças mobilizadas para esta carga (limite correspondente à “capacidade de carga”) representada na Figura 8. Assim, partindo dos mesmos valores da simulação anterior, ou seja, 1016 kN e 494 kN para o fuste e a ponta, respetivamente, e utilizando um valor de  $\beta$  constante, foi possível chegar a um  $\beta$  igual a 2,1 e a um coeficiente  $N_i$  de 36.

Forçando novamente a carga residual máxima, obteve-se a “verdadeira” simulação da distribuição das forças últimas, representada na Figura 8. O valor de  $\beta$  que permitiu encontrar esta distribuição é aproximadamente igual a 1, mantendo-se o parâmetro  $N_i$  igual a 73.

À partida pode-se dizer que o valor de  $\beta$  não está em concordância com os valores recomendados pelos códigos HKGEO (2005) e o CFEM da *Canadian Geotechnical Society* (1992). No entanto, esses últimos valores estão de acordo com estacas de grande comprimento, o que não é o caso dos estudos nestes trabalhos. Em estacas mais pequenas, verifica-se a situação exposta em Rollins *et al.* (2005), que indica claramente valores de  $\beta$  maiores à superfície, decrescendo com a profundidade. Este aspeto conjugado com o comprimento de 6 metros da estaca cravada traduz-se num valor médio de  $\beta$  maior, daí o valor de 1 para este parâmetro ser aceitável. Relativamente ao parâmetro  $N_i$ , o seu valor está de acordo com o parâmetro  $\beta$ , tendo em conta as relações apresentadas por Fellenius (2009).

Ambos os resultados mostram que o ponto de transição do sentido da carga residual se encontra aos 6 metros. Este resultado era expectável uma vez que na simulação se assumiu que a carga residual seria máxima, levando assim a que a compensação da carga ocorresse ao longo de todo o fuste.

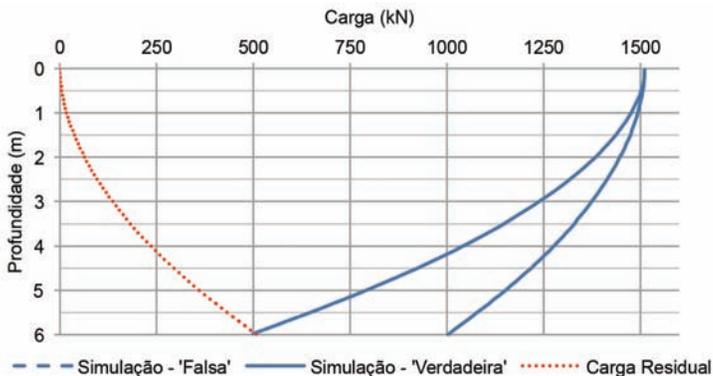


Fig. 8 – Simulação da capacidade de carga da estaca cravada C1:  $\beta$  constante.

Torna-se agora possível gerar as curvas de transferência de carga. Para tal, pode-se usar qualquer uma das evoluções da capacidade de carga apresentadas anteriormente, uma vez que as resistências totais, referentes ao fuste e à base, se mantêm nas duas, e a evolução da mobilização faz-se diretamente.

Como já foi referido, na estaca cravada não se dispunha de leituras de extensómetros e, como tal, não foi possível fazer a extrapolação para obter as curvas de capacidade de carga para o fuste e a base. Tendo em conta esta limitação, optou-se por fazer a simulação utilizando a curva de transferência de carga do fuste correspondente à estaca moldada E9 e adaptar a curva correspondente à ponta. Os resultados são apresentados na Figura 9.

O resultado aponta para uma mobilização quase total da resistência de ponta para um deslocamento bastante pequeno (cerca de 10 mm). Este comportamento, que para estacas “escavadas” (ou seja, sem deslocamentos no terreno) é considerado inaceitável, é válido para a estaca cravada uma vez que os efeitos da sua instalação provocam um adensamento substancial do solo, conferindo-lhe uma maior rigidez e mobilizando um valor significativo da carga residual de instalação. Assim, conclui-se que a adaptação da simulação aos resultados do ensaio é bastante boa.

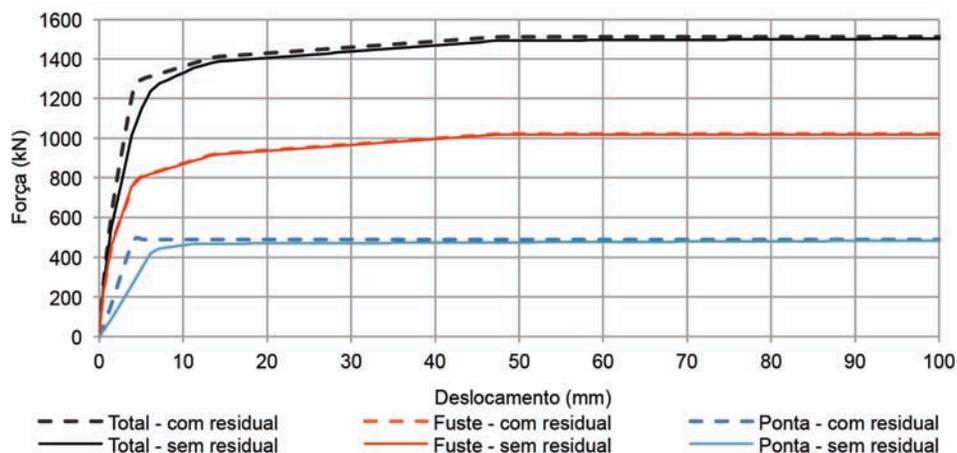


Fig. 9 – Comparação das simulações com e sem carga residual para a estaca cravada C1.

Na comparação das curvas de transferência de carga obtidas para as situações com e sem carga residual, isto é, que preveem ou não a existência de cargas “congeladas” após a cravação da estaca, verificou-se uma situação bastante interessante uma vez que os cálculos revelam, para as considerações tomadas ao longo do trabalho, que as curvas são bastante semelhantes. Apenas se nota uma maior rigidez na mobilização da ponta na situação em que a carga residual é máxima como se pode ver na Figura 9. Isto pode dever-se ao facto de, devido à estaca ser cravada, o solo apresentar maior rigidez junto da ponta, implicando que se dê a mobilização da resistência de ponta mais cedo.

#### 4.2 – Estaca moldada com tubo recuperado

A análise da estaca moldada com recurso a vara kelly e a tubo metálico recuperado (E9), apesar de bem instrumentada, apresenta resultados extraídos dos extensómetros para as primeiras camadas pouco fiáveis, a que não é estranho o facto de o maciço terroso no primeiro metro ser um pouco heterogéneo (aterro antrópico). Optou-se então por se fazer uma aproximação da curva da distribuição das forças mobilizadas em profundidade para a carga limite (correspondente à “capa-

cidade de carga”) desta estaca moldada, semelhante à da estaca de trado contínuo (que será analisada no parágrafo seguinte). Esta aproximação surge por dois motivos:

- existem bastantes semelhanças entre estes métodos construtivos;
- os resultados dos extensómetros referentes à estaca de trado contínuo parecem ser mais fiáveis, embora não apresentem resistência no primeiro metro de estaca (muito provavelmente pela forte perturbação de terreno no primeiro metro desde a superfície, decorrente do arranque do trado com o betão já sem pressão).

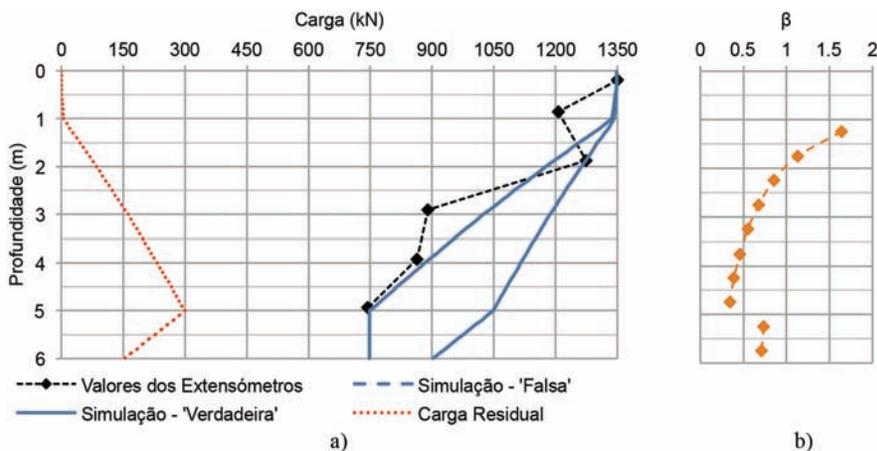
Assim, nesta simulação, optou-se por não se considerar a resistência correspondente ao primeiro metro de solo, atribuindo-lhe um  $\beta$  igual a 0. No entanto, como a resistência lateral depende também da coesão, vai haver uma pequena variação da resistência lateral nessa faixa, mas que pode ser considerada desprezável.

Para a simulação, e uma vez que não era este o objetivo do trabalho, tomaram-se como aceitáveis os valores apresentados em Viana da Fonseca *et al.* (2007). Nesse trabalho, utilizando um modelo matemático baseado nas relações de Cambefort e desenvolvido por Massad (1992, 1993) – Método das Duas Retas Modificado (MDRM) – chegou-se a um valor de 150 kN de carga residual, para esta estaca moldada (E9).

Uma questão que se levantou durante as simulações refere-se ao facto de o programa *UniPile*® assumir que a distribuição da carga residual resulta do equilíbrio estático de forças de interação do elemento estrutural e terreno. Admitindo a mobilização total da tensão lateral, isto é, ao longo do comprimento da estaca, o atrito lateral é igual à resistência lateral unitária. Assim, na simulação do ensaio de carga estático, o valor da carga última (capacidade de carga) introduzido no programa não muda, a partir do momento em que se atinge o ponto de equilíbrio das forças mobilizadas pela presença de carga residual, implicando ausência de resistência lateral ao longo desse comprimento. Este facto levou a que se considerasse que a resistência lateral era totalmente mobilizada e que o ponto de equilíbrio da carga residual se situaria entre os 4 e os 6 metros.

O primeiro cenário assume que a resistência do solo é constante ao longo de todo o comprimento. Esta suposição leva a valores de  $\beta$  distintos e com uma distribuição polinomial ao longo do restante comprimento da estaca, conduzindo ao resultado apresentado na Figura 10.

Como se pode observar, na Figura 10 são apresentados dois resultados distintos para além dos resultados extraídos diretamente dos extensómetros: a “falsa” e a “verdadeira” resistência. A curva

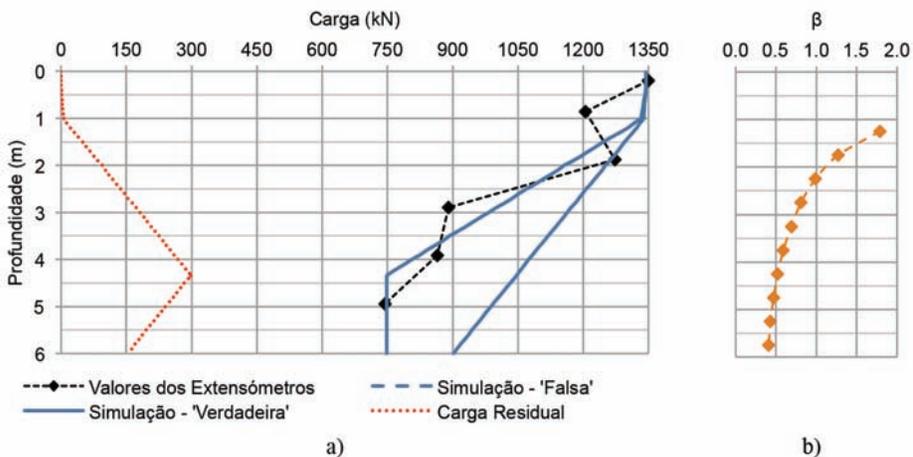


**Fig. 10** – Simulação da capacidade de carga da estaca moldada E9: a) linear (com carga residual igual a 150 kN e plano neutro aos 5 metros); b) coeficiente  $\beta$ .

correspondente à verdadeira resistência é a que tem mais relevância. Esta indica a real distribuição da transferência de carga, em particular na rotura, ou seja, a capacidade da estaca mobilizada em profundidade, permitindo chegar aos novos valores da capacidade do fuste e da ponta. O facto de não se considerar carga residual leva a sobrestimação da resistência lateral e a uma subestimação da resistência de ponta. No entanto, o valor total da capacidade permanece inalterado. Sabe-se agora que as resistências correspondentes ao fuste e à ponta são iguais a 450 kN e 900 kN, respetivamente. Estes estão em contraponto com valores extraídos diretamente dos resultados do ensaio que são aproximadamente iguais a 600 kN e 750 kN para o fuste e ponta, respetivamente. A falsa resistência corresponde à aproximação dos valores da simulação com os extraídos dos extensómetros e surge da diferença entre a distribuição de resistência lateral e de ponta que se espera para a condição realista da presença de carga residual.

Esta aproximação é bastante razoável e encontra-se em sintonia com os resultados, mas para que o ponto de transição das cargas residuais se situasse nos 5 metros, foi necessário atribuir valores de  $\beta$  mais elevados na última camada, o que implicaria que esta camada teria uma resistência anormalmente muito elevada. Assim, a resistência lateral entre os 1 e os 5 metros seria de 39 kPa e de 77 kPa na restante. Esta possibilidade foi considerada muito pouco provável uma vez que não existe nenhuma evidência geotécnica, nomeadamente os resultados dos ensaios in situ (CPT, DMT, Cross-hole) realizados na vizinhança (Viana da Fonseca *et al.*, 2006), que sustente esta súbita alteração da resistência lateral. Relativamente ao fator de ponta,  $N_p$ , a capacidade encontrada remete para um valor de 28. A carga residual foi simulada impondo que esta fosse igual a uma percentagem da resistência de ponta. O facto de se querer atribuir um valor de 150 kN aponta para uma percentagem da resistência de ponta igual a 17%.

O segundo cenário reproduz uma simulação bastante semelhante à anterior mas na qual o parâmetro  $\beta$  continua a evoluir exponencialmente depois dos 5 metros. Nestes termos, não houve imposição de que o ponto de transição do sentido da carga residual seria aos 5 metros. Tendo em conta isto, obteve-se a curva de capacidade de carga representada na Figura 11.



**Fig. 11** – Simulação da capacidade de carga da estaca moldada E9: a) linear (com carga residual igual a 150 kN e plano neutro aos 4,3 metros); b) coeficiente  $\beta$ .

Analisando a Figura 11 pode-se verificar que a falsa distribuição não acompanha perfeitamente os registos dos extensómetros, em particular na zona mais profunda da estaca (entre 4 e 5 metros). No entanto, esta tendência é bastante consistente uma vez que os resultados retirados do ensaio, para esta estaca E9, não apresentam uma linearidade demarcada. Neste caso, o plano neutro encontra-se aos 4,3 metros.

Desta “verdadeira” resistência passa a deduzir-se um valor unitário da resistência lateral igual a 49 kPa. Este valor é mais aceitável, uma vez que é constante a partir da profundidade de 1 metro até ao final da estaca.

À semelhança do que já tinha sido feito na estaca cravada, aqui também se optou por apresentar uma simulação em que o valor do parâmetro  $\beta$  é constante, apontando para uma evolução crescente da resistência lateral unitária.

O valor de  $\beta$  encontrado foi de 0,63, tendo-se mantido tanto o parâmetro  $N_i$  como a percentagem necessária ao ajuste à carga residual estimada pelo MDRM. Neste caso, não houve a necessidade de considerar a resistência do primeiro metro de solo nula uma vez que os baixos valores de  $\beta$  nessa camada representam uma resistência muito baixa, como se pode verificar na Figura 12. Verifica-se também um acompanhamento da “falsa” resistência aos valores dos extensómetros e que o eixo neutro se encontra ligeiramente acima dos cinco metros.

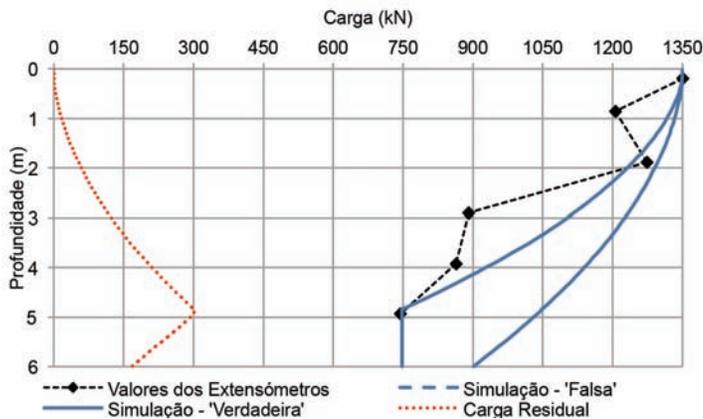


Fig. 12 – Simulação da capacidade de carga da estaca moldada E9:  $\beta$  constante (com carga residual igual a 150 kN).

Uma vez que as simulações anteriores garantem a mesma capacidade para o fuste e a ponta e a carga residual é igual em todas, é possível gerar as curvas de transferência de carga utilizando qualquer uma das distribuições. Para a simulação das curvas de transferência de carga utilizou-se o método seguinte: a curva referente à ponta é definida utilizando o parâmetro “ $e$ ” e a referente ao fuste é delimitada através de 5 pontos. O resultado é apresentado na Figura 13 e confronta os resultados do ensaio estático, que não tiveram em conta as cargas residuais, com a simulação que tem em conta a presença dessas cargas. Em princípio, se tivesse havido a possibilidade de calibrar os extensómetros no início do ensaio de carga estático, estas seriam as curvas obtidas.

A curva ‘q-z’ mostra ter um crescimento suave sem ter um valor de pico distinto, apresentando um valor da carga à cabeça igual a 670 kN para um movimento de 100 mm.

Uma evidência extraída destes resultados é o facto de o fuste apresentar um amortecimento da resistência lateral para um movimento da cabeça da estaca de, aproximadamente, 13 mm, no qual é atingido o máximo de 600 kN decrescendo para 494 kN até aos 100 mm. Os resultados extraídos diretamente dos extensómetros não apontavam para tal, acredita-se que por falta de capacidade de registo deste amortecimento. Este facto pode dever-se a uma cedência da resistência de “pico”, ou alguma perda de estrutura ainda preservada do terreno envolvente (mantida ainda por alguma rugosidade ao longo do fuste), que deixa de se mobilizar para grandes deformações.

Depois de se ter analisado a estaca moldada, garantindo sempre uma carga residual igual a 150 kN, foi levantada uma questão: será que a carga residual pode tomar outro valor de modo a que garanta uma correta distribuição?

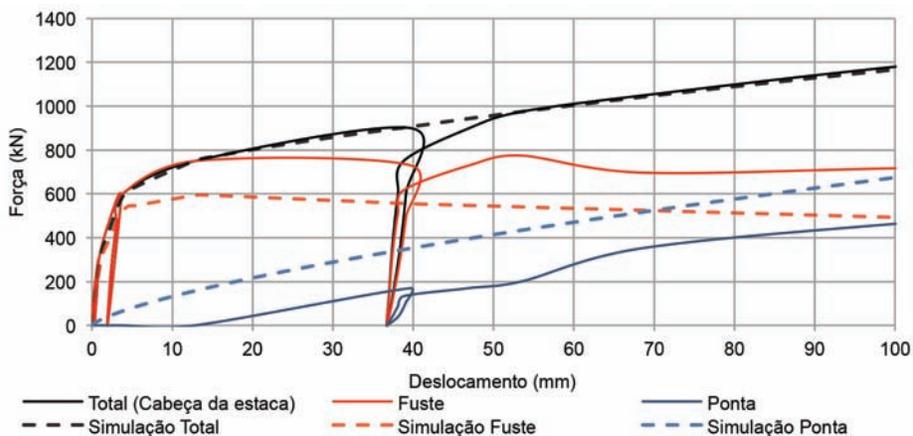


Fig. 13 – Simulação das curvas de transferência de carga – estaca moldada E9 (carga residual igual a 150 kN).

A próxima modelação visa tentar encontrar o valor dessa carga residual para a que se pensou ser a distribuição da falsa resistência mais correta. Esta distribuição acompanha os resultados dos extensómetros de forma linear entre as profundidades de 1 e de 5 metros, ficando o ponto de transição das cargas residuais aos 5 metros. Na Figura 14 esquematiza-se este exercício.

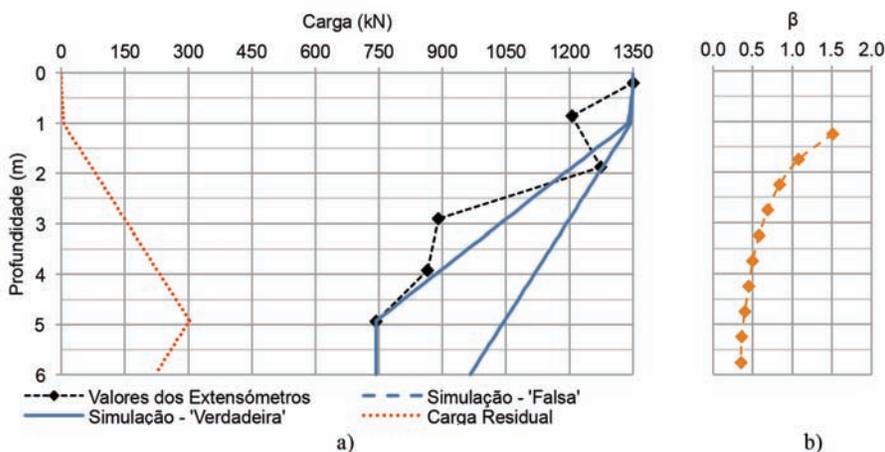


Fig. 14 – Simulação da capacidade de carga da estaca moldada E9: a) linear (com carga residual igual a 220 kN e plano neutro aos 5 metros); b) coeficiente  $\beta$ .

Relativamente à carga de ponta, foi necessário utilizar um parâmetro  $N$ , igual a 30 e para a resistência lateral utilizaram-se os valores de  $\beta$  indicados na Figura 14b. Estes parâmetros conduziram a um valor total da resistência de ponta e lateral igual a 966 kN e 384 kN, respetivamente. A resistência lateral unitária é aproximadamente igual a 40 kPa.

A carga residual encontrada é igual a 220 kN, o que corresponde a 23% de resistência de ponta.

Na Figura 15 mostra-se a simulação das curvas de transferência de carga referentes a este caso. Verificam-se diferenças na curva correspondente à ponta. Esta apresenta agora uma carga à cabeça de praticamente 700 kN para um movimento de 100 mm.

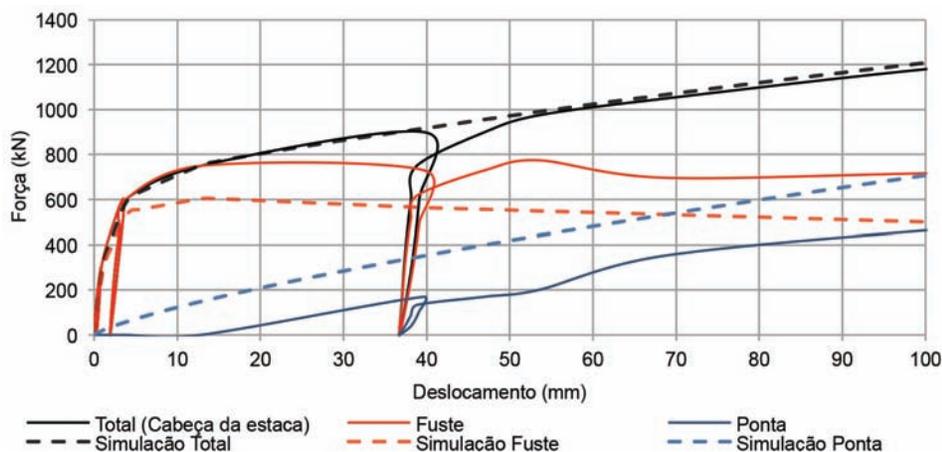


Fig. 15 – Simulação das curvas de transferência de carga - estaca moldada E9 (carga residual igual a 220 kN).

#### 4.3 – Estaca de trado contínuo (CFA)

A estaca de trado contínuo (designada por T1) foi a que apresentou os resultados mais fiáveis, mostrando haver uma linearidade entre todos os valores retirados dos extensómetros, exceto no primeiro, para o último ciclo de carregamento. O facto de não haver diferença na carga entre o primeiro e o segundo extensómetro, indicando a ausência de resistência lateral, pode dever-se a perturbações (desconfinamento, etc.) no primeiro metro de solo, como aliás já se havia verificado na estaca moldada. Mais uma vez, nesta estaca também se levantou o problema da incerteza da extrapolação dos resultados para a ponta (base) da estaca.

Procedeu-se então às simulações relativas à estaca de trado contínuo tendo em conta as cargas residuais e que vão permitir encontrar os parâmetros  $\beta$  e  $N_i$  que mais realisticamente definem a capacidade de carga da estaca. À semelhança do que já foi apresentado para a estaca moldada, foi usado o valor da carga residual proposto no trabalho de Viana da Fonseca *et al.* (2007), à luz do Método das Duas Retas Modificado (Massad, 1992, 1993) e que é igual a 150 kN.

Na primeira simulação forçou-se, para além da carga residual, a posição do plano neutro para que se situasse à profundidade de 5 metros e que a resistência ao longo do fuste se distribuisse de forma linear entre as profundidades de 1 a 5 metros. Posto isto, obteve-se a distribuição apresentada na Figura 16.

Pode observar-se que a “falsa” resistência (a que simula o registo dos extensómetros) acompanha os resultados do ensaio no 5º ciclo do carregamento até aos 5 metros de profundidade. A partir desse ponto até ao fim da estaca (a 6 metros), o resultado não apresenta resistência lateral, indicando que o plano neutro se encontra a essa profundidade.

Relativamente à verdadeira resistência, o resultado não foi muito bom. Verifica-se que, de modo a situar o plano neutro à profundidade indicada, há necessidade de aumentar a resistência lateral unitária a partir dessa profundidade. Entre 1 e 5 metros a verdadeira resistência lateral unitária passa a ser de 35 kPa. A partir desse ponto até ao final da estaca, assume o valor de 65 kPa. Como já tinha sido referido para a estaca moldada, não existe nenhuma relevância geotécnica que aponte para tal e como tal não é muito realista. Por seu lado, a ponta da estaca apresenta uma capacidade de 770 kN, correspondendo a um valor de  $N_i$  igual a 23,5, também pouco razoável.

Tendo em conta o referido simulou-se outra distribuição, na qual não se admitiu que a posição do eixo neutro se encontraria à profundidade de 5 metros. O ponto de transição do sentido da carga residual subiu para os 4,55 metros de profundidade, fazendo com que a simulação da falsa resis-

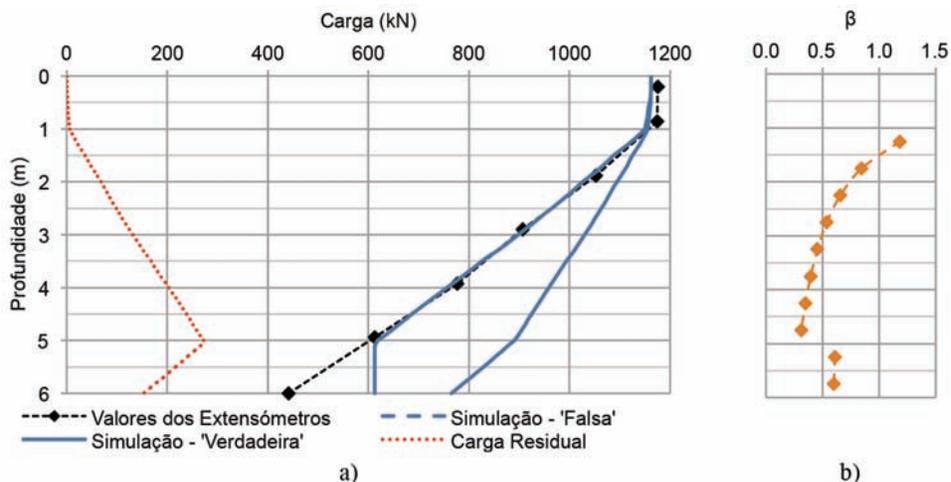


Fig. 16 – Simulação da capacidade de carga da estaca de trado T1: a) linear (carga residual igual a 150 kN e plano neutro aos 5 metros); b) coeficiente  $\beta$ .

tência não acompanhasse os valores dos extensômetros, ao contrário do que tinha acontecido na estaca moldada, em que não havia uma linearidade marcada nos resultados dos mesmos.

Mesmo assim, apesar destas incongruências, optou-se por simular as curvas de transferência de carga correspondentes, que são apresentadas na Figura 17. A simulação da curva de transferência de carga relativa ao fuste foi conseguida utilizando 5 pontos e para simulação da curva correspondente à ponta utilizou-se um valor do parâmetro “e” de 0,3.

Pode-se observar que a curva de transferência de carga total se encontra em concordância com a curva extraída do ensaio de carga estático. No entanto, as curvas correspondentes tanto ao fuste como à ponta são bastante diferentes das obtidas sem a consideração da carga residual, representando bem as calculadas a partir da instrumentação direta do ensaio de carga estático.

As curvas simuladas seriam, em princípio, as obtidas caso se tivesse tido a possibilidade de “zerar” os extensômetros, de modo a apenas se extrair diretamente a curva que reflete a interação solo-estaca desde o seu processo construtivo (instalação).

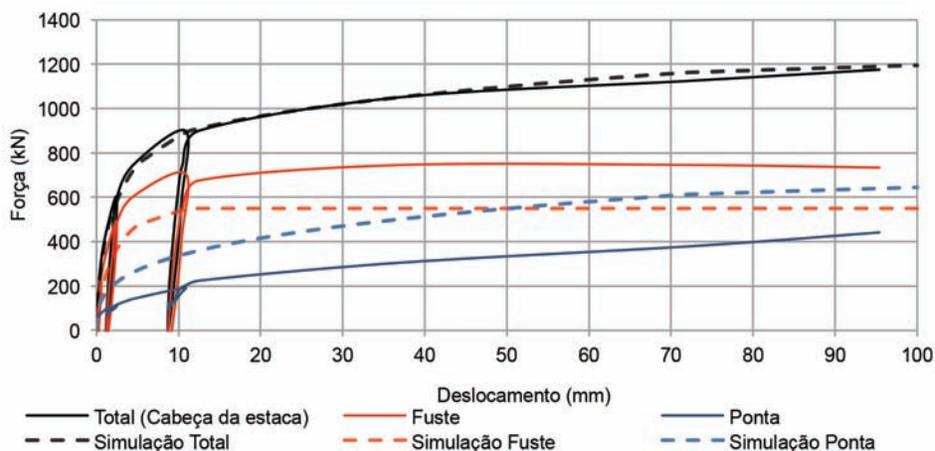


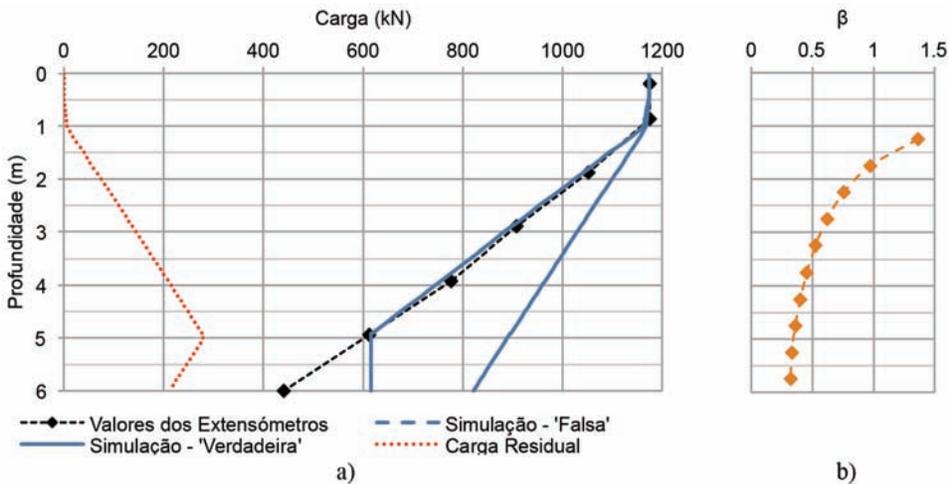
Fig. 17 – Simulação das curvas de transferência de carga – estaca de trado T1 (carga residual igual a 150 kN).

Outra possibilidade estudada refere-se à não consideração do valor da carga residual proposto pelo MDRM de 150 kN. Assim, impondo o ponto de transição das cargas residuais aos 5 metros e uma carga lateral unitária constante até esse ponto, procura-se estimar qual a carga residual que permitiria chegar a estes pressupostos.

Partindo sempre do pressuposto que existe uma mobilização total da resistência lateral, encontrou-se uma carga residual de 205 kN, correspondendo a 25% da resistência de ponta. Esta carga permitiu que a simulação da falsa resistência acompanhasse os valores dos extensômetros e que a verdadeira resistência fosse linear desde um metro de profundidade até ao fim da estaca. Esta hipótese está em boa concordância com a caracterização geotécnica.

Segundo a verdadeira resistência, o fuste apresenta uma capacidade de 355 kN, correspondendo a uma resistência lateral unitária de 36 kPa a partir da profundidade de 1 metro até ao final da estaca. Os valores do parâmetro  $\beta$  encontram-se discriminados em profundidade na Figura 18b. Relativamente à ponta passa-se a ter uma capacidade de 820 kN, correspondendo a um valor de  $N_t$  igual a 25.

A simulação do ensaio de carga estático é que não permitiu obter resultados tão perfeitos. Para simular as curvas de transferência de carga utilizaram-se as formas das curvas do ensaio anterior. Na Figura 19, pode-se observar que a curva de transferência de carga total apenas acompanha os resultados do ensaio até aos 10 mm. Para as cargas seguintes, e pós-ciclo de carga-descarga, os resultados simulados são ligeiramente superiores aos extraídos do ensaio, a que não é estranho os fenómenos de endurecimento – amolecimento por carga e descarga. Assim mesmo verifica-se que a ponta apresenta uma capacidade ligeiramente superior resultado de alguma rigidificação pós-ciclos, mas sobretudo denotando um amortecimento da resistência lateral depois do ciclo, à semelhança do que já tinha sido encontrado para a estaca moldada mas agora de forma mais pronunciada. Tal comportamento é lógico e substanciado, já que em se tratando de um carregamento pós-ciclo pode ter-se acelerado a evolução para a resistência lateral, ou seja, a volume constante.



**Fig. 18** – Simulação da capacidade de carga da estaca de trado T1: a) linear (carga residual igual a 205 kN); b) coeficiente  $\beta$ .

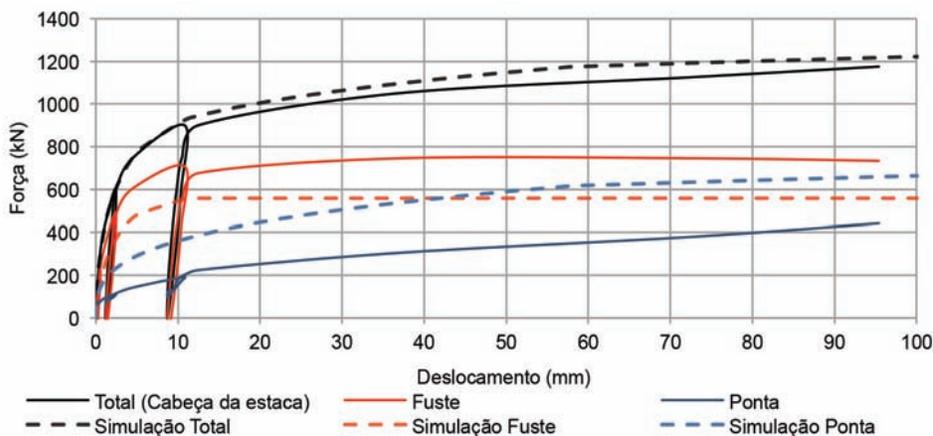


Fig. 19 – Simulação das curvas de transferência de carga – estaca de trado T1 (carga residual igual a 205 kN).

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram analisados os três tipos de estacas que foram executados no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) no âmbito do “International Pile Prediction Event” realizado entre 2003 e 2004 aquando da Conferência Internacional “ISC’2” organizado na FEUP em 2004 (detalhes em Viana da Fonseca e Santos, 2008). Na análise que aqui se explorou foi utilizado o programa *UniPile* da *Unisoft*<sup>®</sup> e teve-se sempre presente trabalhos publicados anteriormente com análises diversas sobre o comportamento destas estacas.

Uma primeira abordagem refere-se à capacidade de carga da estaca. O programa permitiu diversas hipóteses para a resolução do problema, tais como a consideração de uma resistência lateral unitária constante ou crescente e a consideração ou não de cargas residuais, tão importantes na correta avaliação das curvas de transferência de carga pelo fuste e pela ponta da estaca. Ficaram bem explícitas as implicações que uma incorreta avaliação das cargas residuais criadas no decurso da construção/instalação das estacas (ou pior, a sua não consideração) têm numa inexacta (“falsa”) avaliação da distribuição das cargas mobilizadas ao longo do fuste e na ponta e, particularmente, na carga limite última (o que corresponde às resistências pelo fuste e pela ponta).

Um dos objetivos primordiais deste trabalho foi encontrar, para cada estaca, as curvas de transferência de carga expectáveis, caso se tivesse o cuidado de “zerar” os extensómetros previamente à instalação de qualquer elemento introduzido no terreno (sejam os tubos ou outros elementos de escavação, sejam os próprios elementos pré-fabricados). Só assim se poderia determinar diretamente as cargas residuais.

Procurou-se fornecer informação que permite a análise de ensaios em protótipos (seja em investigação, seja em projeto), conduzindo o especialista em geotecnia, em particular de fundações especiais, a melhor compreender os fenómenos envolvidos na transferência de carga.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer ao Prof. Bengt Fellenius pelas trocas de opiniões e pela cedência do programa de cálculo, por via da UniSoft. Este trabalho enquadra-se nas atividades do centro de investigação CEC-FEUP, da Fundação para a Ciência e Tecnologia, e foi desenvolvido no âmbito do projeto PTDC/ECM/70505/2006, “Large Diameter Piles Under Axial Loading”. Os ensaios das

estacas realizados no CEFEUP só foram possíveis pela preciosa ajuda financeira e logística das empresas Mota-Engil, SA – Direções de Fundações Especiais e de Geotecnia; Teixeira Duarte S.A.; Sopecate, S.A.; Tecnasol FGE, S.A. e A. M. Mesquita & Filhos.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Canadian Geotechnical Society (1992). *Canadian foundation engineering manual (CFEM)*. 3rd ed. BiTech Publishers, Richmond, B.C.
- Coyle, H.M.; Reese, L.C. (1966). *Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 92(2), pp. 1-26.
- Costa Esteves, E.F.M. (2005). Ensaios e Análise de Resposta de Estacas em Solo Residual do Granito Sob Acções Verticais. Tese de Mestrado - FEUP, Porto, Portugal.
- Fellenius, B.H. (2002). *Determining the true distribution of load in piles*. ASCE, International Deep Foundation Congress, An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance, Geotechnical Special Publication No. 116. Orlando, Florida, February 14 - 16, Vol. 2, pp. 1455-1470.
- Fellenius, B.H. (2009). *Basics of Foundation Design*. Editor, Electronic Ed. [www.fellenius.net, consultada em março de 2010].
- Fellenius, B.H.; Altaee, A.A. (1995). *Critical depth: how it came into being and why it does not exist*. Proceedings ICE Geotechnical Engineering. Vol. 113, pp. 107-111.
- Fellenius, B.H.; Goudreault, P.A. (1998). *UniPile user manual*. Version 4.0. UniSoft Ltd., Calgary, Alberta.
- Fellenius, B.H.; Santos, J.A.; Viana da Fonseca, A. (2007). *Analysis of piles in a residual soil – The ISC'2 prediction*. Can. Geotech. Journal, 44(2), 201-220, NCR Research Press, Canada.
- Fernandes, D. (2010). *Definição de Curvas de Transferência de Carga de Estacas em Solo Residual do Granito*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Guo, W.D. (1996). *Analytical and Numerical Solutions for Pile Foundations*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Western Australia.
- HKGEO (2005). *Foundation design and construction*. Draft ed., Government of Hong Kong.
- Massad, F. (1992). Sobre a interpretação de provas de carga em estacas, considerando as cargas residuais na ponta e a reversão do atrito lateral. Parte I: solos relativamente homogêneos. Solos e Rochas, Vol. 15, nº 2, pp. 103-115.
- Massad, F. (1993). Sobre a interpretação de provas de carga em estacas, considerando as cargas residuais na ponta e a reversão do atrito lateral. Parte II: estaca embutida em camada mais resistente. Solos e Rochas, Vol. 16, nº 2, pp. 93-112.
- Massad, F. (1995). *Pile analysis taking into account soil rigidity and residual stresses*. Proc. Xth Panamerican Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Guadalajara, México, Nov/1995, vol. 2, pp. 1199-1210.
- Poulos, H.G.; Davis E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*, John Wiley, New York.
- Rollins, K.M.; Clayton, R.G.; Mikesell, R.C.; Blaise, B.C. (2005). *Drilled shaft side friction in gravelly soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(8), ASCE, pp. 987–1003.

- Ruiz, M.E. (2005). Study of Axially Loaded Post Grouted Drilled Shafts Using CPT Based Load Transfer Curves. Tese de Mestrado, Universidade de Porto Rico.
- Sousa, C.T. (2006). Ensaios e Análise de Resposta de Estacas em Solo Residual do Granito sob Acções Horizontais. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Vesic, A.S. (1977). *On the Significance of Residual Loads for Load Response of Piles*. IX International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.3, Stockholm, pp. 373-379.
- Viana da Fonseca, A. (1996). Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia do Porto.
- Viana da Fonseca, A. (2003). *Characterizing and deriving engineering properties of a saprolitic soil from granite in Porto*. Tan et al. (Eds.) Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. Sweets & Zeitlinger. Lisse, pp. 1341-1378.
- Viana da Fonseca, A.; Matos Fernandes, M.; Cardoso, A.S. (1997). *Interpretation of a footing load test on a saprolitic soil from granite*. Géotechnique, vol.47, no. 3, pp.663-651.
- Viana da Fonseca, A.; Costa Esteves, E.F.M.; Santos, J. (2004). *Ensaios de carga verticais em estacas executadas em solo residual do granito*. Atas do SEFE V (Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia). São Paulo, Brasil.
- 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 techniques*. Geotechnical and Geological Engineering, 24, pp. 1307–1348.
- Viana da Fonseca, A.; Santos, J. (2008). International Prediction Event. Behaviour of Bored, CFA and Driven Piles in Residual Soil. ISC'2 experimental site. 699 p. Pub. Univ. of Porto (FEUP) & Tech. Univ. of Lisbon (IST-UTL).  
In: <http://paginas.fe.up.pt/sgwww/labgeo/pdf/Book-IPPE-Piles-ISC2.pdf>
- Viana da Fonseca, A.; Santos, J.A.; Costa Esteves, E.F.M.; Massad, F. (2007). *Analysis of Piles in Residual Soil from Granite Considering Residual Loads*. Soils and Rocks, 26/01/2007, São Paulo, pp.63-80.