



Uso de sondagens CPT e modelos numéricos para previsão de comportamento de estaca

Dr. Ricardo Bergan Born
Geotécnico, BornSales Engenharia / UFRGS, Balneário Camboriú, Brasil,
ricardo@bornsales.com.br

Luis Fernando P. Sales, M.Sc.
Geotécnico, BornSales Engenharia / UNIVALI, Balneário Camboriú, Brasil,
luis@bornsales.com.br

Renan Eduardo Cordeiro, M.Sc.
Geotécnico, BornSales Engenharia / UFRGS, Balneário Camboriú, Brasil,
renan@bornsales.com.br

Marcus V. A. Belloli, M.Sc.
Geotécnico, BornSales Engenharia, Balneário Camboriú, Brasil, marcus@bornsales.com.br

RESUMO: O estudo de caso mostra a utilização de sondagens tipo CPT para caracterização do perfil geotécnico e previsão de carga de ruptura, e modelos numéricos para previsão de comportamento da estaca. As metodologias de cálculo para a previsão baseada em CPT, a parametrização do perfil geotécnico, e os conceitos aplicados nos modelos numéricos são discutidos. Os resultados das previsões de carga de ruptura, distribuição de carga lateral ao longo do comprimento da estaca, e deslocamentos, são confrontados com os resultados de uma prova de carga instrumentada. Os resultados da análise classe A mostram uma excelente aproximação entre as grandezas medidas e calculadas.

PALAVRAS-CHAVE: fundações, CPT, modelo numérico, MEF, hélice contínua.

ABSTRACT: The case study shows the use of CPT soundings for geotechnical profiling and prediction of pile load capacity, and numerical models for prediction of pile behavior. The calculation methodologies for CPT-based prediction, geotechnical profile parameterization, and the concepts applied in numerical models are discussed. The results of pile load capacity prediction, shaft load distribution along the length of the pile, and displacement are compared with the results of an instrumented pile load test. The results of the Class A analysis show an excellent approximation between the measured and calculated variables.

KEYWORDS: foundation, CPT, numerical model, FEM, CFA.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





1 Introdução

A análise de capacidade de carga axial em estacas sempre foi um tema de grande interesse na engenharia de fundações. O conjunto estaca-solo submetido a carregamentos axiais é caracterizado por um comportamento não-linear, e governado por complexas mudanças de relação entre tensões e deformações que variam em função do tipo de solo e estaca.

Uma das mais usuais técnicas de previsão da capacidade de suporte de estacas é através da utilização de métodos semiempíricos, os quais correlacionam as resistências de ponta (q_b) e por atrito lateral (q_s) com dados retirados de ensaios de campo. (TERZAGHI, 1943; VIGGIANI; MANDOLINI; RUSSO, 2012). Sua previsão com acurácia é de difícil realização, pois entende-se que nenhum método é capaz de prever o comportamento real de uma fundação, devido a erros inerentes a formulação empírica, bem como imprecisão dos ensaios de campo. (BOWLES, 1997).

A confiabilidade dos métodos está relacionada intimamente com a definição dos parâmetros geotécnicos, adquiridos por algum tipo de investigação geotécnica, sendo então os ensaios de campo um ponto vital na qualidade do dimensionamento. Embora esteja sendo utilizado desde a década de 1950, o ensaio de cone (CPT) ainda é pouco utilizado como principal elemento no dimensionamento de fundações profundas, sendo preterido pelo rudimentar ensaio SPT. (SCHNAID, 2000; MAYNE, 2007).

Uma das formas de entender o comportamento carga *versus* deslocamento de uma estaca é por meio da realização do ensaio de prova de carga estática instrumentada (PCE). A instrumentação possibilita analisar a transferência de carga na estaca teste ao longo do seu fuste, conforme as profundidades ou níveis de instalação da instrumentação. (CINTRA *et al.*, 2013). Entre o topo e a ponta da estaca, a carga diminui continuamente, devido à mobilização do atrito lateral junto ao fuste.

O uso da ferramenta de análise numérica, quando implementada a partir de uma campanha qualificada de investigação geotécnica e resultados de prova de carga instrumentada, possibilita expandir as análises do comportamento das fundações. Uma vez que o modelo converge para o resultado da prova de carga, é possível reproduzir o conjunto de estacas e avaliar o comportamento do efeito de grupo.

No presente trabalho foram utilizados os resultados de sondagem tipo CPT para a caracterização do perfil geotécnico, definição dos parâmetros geotécnicos e previsão de carga de ruptura, e modelos numéricos para a previsão do comportamento carga *versus* deslocamento da estaca. As metodologias de cálculo para a previsão baseada em CPT, a parametrização do perfil geotécnico, e os conceitos aplicados nos modelos numéricos são discutidos.

2 Localização da área de estudo

O campo de ensaio é localizado na região da praia central do município de Balneário Camboriú-SC. O solo local é de formação marinha-eólica (depósito sedimentar) e o relevo é plano, típico da planície costeira brasileira. Na figura 1 tem-se a localização do município, com destaque para a região da praia central de Balneário Camboriú-SC.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



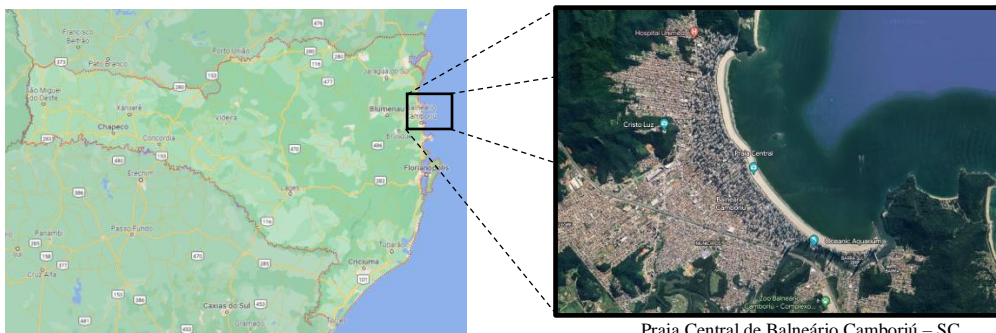
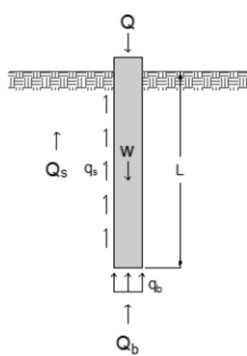


Figura 1. Localização da área de estudo.

A metodologia apresentada neste trabalho foi aplicada no desenvolvimento do projeto geotécnico de fundações de um edifício residencial, com 105 m de altura. Ainda na fase de projeto, foi realizado o ensaio de prova de carga estática instrumentada (PCE), com estaca tipo hélice contínua monitorada (HCM), com diâmetros de 0,70 m e comprimento de 27,5 m. A campanha de investigação geotécnica foi realizada a partir de ensaios de cone (CPT).

3 Capacidade de carga em estacas

A carga aplicada na cabeça da estaca é transmitida para o solo, parte por força normal até a base e parte por atrito lateral na interface estaca solo, tendo variações na capacidade portante de atrito e ponta em função do tipo de estaca. A definição de capacidade de carga é demonstrada pelo equilíbrio entre a carga aplicada, o peso da estaca e a resistência disponível (Figura 2).



Onde:

$$Q_{ult} = A_b * q_b + U \int_0^L q_s dz \quad (1)$$

Q_{ult} = carga de ruptura;
 A_b = área da base da estaca;
 q_b = resistência unitária na base da estaca;
 U = perímetro da seção transversal da estaca;
 L = comprimento da estaca; e
 q_s = resistência por atrito lateral unitário da estaca.

Figura 2. Esquema da transferência de carga em estacas.

São vários os métodos semi-empíricos de previsão da capacidade de carga para estacas, cujas formulações consideram os resultados do ensaio de cone (CPT), entre os quais, destacam-se: ICP-05, NGI-05, LPC-13 e Philipponnat.

Os métodos possuem formulações particulares, presentes nas publicações originais, que resultam em valores de resistência de ponta unitária (q_b) e resistência por atrito lateral unitária (q_s). Informações detalhadas da aplicação desses métodos podem ser obtidas no trabalho apresentado por Cordeiro, Born e Sales (2016).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



4 Caracterização geotécnica

Foram realizados 4 (quatro) furos de sondagem CPT. O perfil estratigráfico médio (ver figura 3) pode ser entendido como: 0 a 7 m (areia silto-argilosa); 7 a 13 m (argila arenosa mole); 13 a 17 m (areia siltosa); 17 a 21 m (argila arenosa); 21 a 26 m (areia); 26 a 30 m (areia compacta).

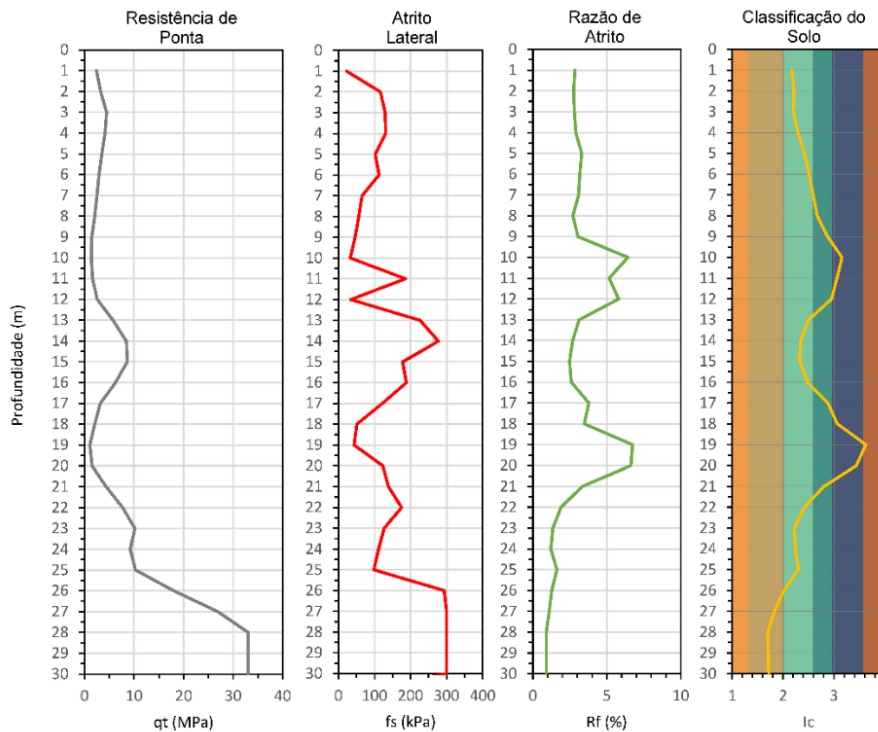


Figura 3. Resultado da sondagem CPT.

Por meio de correlações com o ensaio CPT foram determinados os parâmetros geotécnicos para cada camada de solo (tabela 1). Para determinação do Módulo de Elasticidade (E) foi utilizado a correlação proposta por Robertson e Cabal (2015), para o ângulo de atrito (ϕ) foram utilizadas as correlações propostas por Bolton (1986) e Kulhawy e Mayne (1990), para o coeficiente de Poisson (μ) e intercepto coesivo (c') foram utilizados os valores típicos para o tipo de solo com base na literatura.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos das camadas de solo.

Camada	Descrição	q_c médio (MPa)	f_s médio (kPa)	E (MPa)	μ (adm.)	ϕ ($^\circ$)	c' (kPa)
1	Areia silto-argilosa	3,20	97,0	60,0	0,25	34	6,0
2	Argila arenosa	2,00	96,8	45,0	0,30	28	10,0
3	Areia siltosa	7,60	191,3	85,0	0,30	36	6,0
4	Argila arenosa	1,40	88,9	45,0	0,30	28	10,0
5	Areia	10,20	137,8	82,0	0,25	36	5,0
6	Argila	6,30	98,1	95,0	0,40	30	10,0
7	Areia compacta	29,30	298,6	150,0	0,35	38	5,0

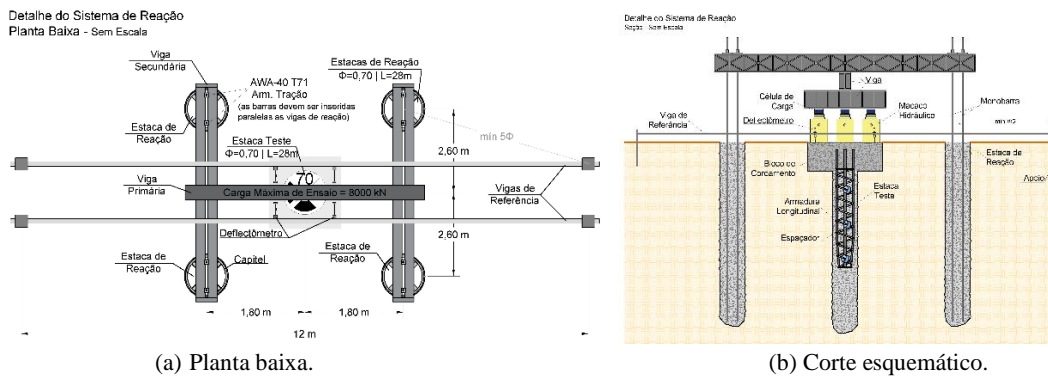
Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



5 Prova de carga instrumentada

Os procedimentos dos ensaios seguiram as prescrições da ABNT NBR 16.903:2020 Solo – Prova de carga estática em fundação profunda. Foi utilizado o sistema de carregamento lento, em estágios iguais e sucessivos de 500 kN, e a carga máxima prevista para o ensaio é de 8.000 kN. A estaca teste é do tipo hélice contínua monitorada, com diâmetro de 0,70 m e comprimento de 27,50 m.

A leitura de carga na cabeça da estaca foi realizada por células de carga e os deslocamentos medidos por 4 (quatro) deflectômetros (LVDT's). Na figura 4 tem-se o desenho em planta e corte esquemático da configuração do ensaio.



(a) Planta baixa.

(b) Corte esquemático.

Figura 4. Configuração do ensaio de prova de carga.

A estaca foi instrumentada em 3 níveis diferentes de profundidade: topo da estaca; 20 m de profundidade; e ponta da estaca. Cada nível de instrumentação foi composto por 2 (duas) *sister bars* (barras de aço instrumentadas com extensômetros), como apresentado na figura 5.

Foram utilizados extensômetros resistivos de 350 Ω , ligados em ponte completa. Para a proteção mecânica, impermeabilização e isolamento elétrico, os extensômetros foram envolvidos em resina epóxi e revestidos com tubo de PVC.

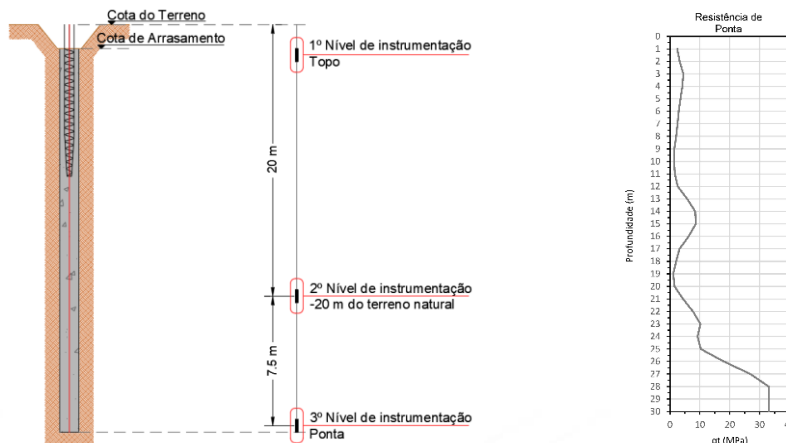


Figura 5. Níveis de instrumentação da estaca teste.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



6 Modelo de elementos finitos

Foram elaborados modelos numéricos nas plataformas ABAQUS e PLAXIS. O solo foi dividido em 7 camadas, cuja descrição e parâmetros geotécnicos estão apresentados no item investigação geotécnica, modelado com comprimento total de 50 m e largura de 20 m, conforme apresentado na figura 6.

Para representação das características geotécnica do solo, foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, com os dados de entrada apresentados na tabela 1. A estaca foi modelada com base na estaca teste executada para PCE. Para representação das características estruturais foi utilizado um modelo elástico com módulo de elasticidade (E) de 25 GPa e coeficiente de Poisson (μ) igual a 0,20.

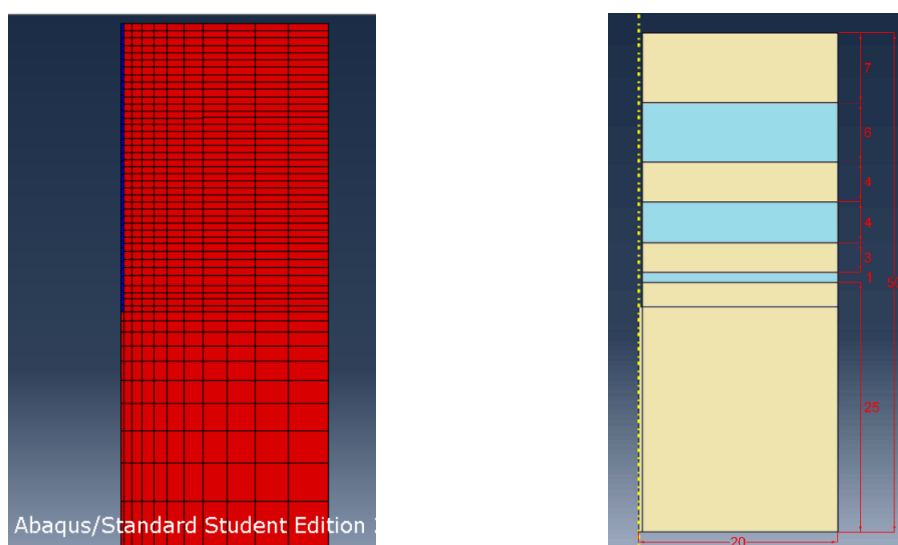


Figura 6. Modelo de elementos finitos (Abaqus).

A interação entre estaca-solo foi simulada com uma componente de comportamento tangencial, que considera uma penalidade através de um coeficiente de atrito. A base do modelo foi fixada contra movimento em qualquer direção. A superfície lateral foi restringida na direção perpendicular a ela. A superfície do solo está livre para se deslocar.

A análise numérica foi conduzida em 2 (dois) estágios de carregamento: (1) aplicação das tensões geostáticas; (2) aplicação do carregamento vertical, através da imposição de um deslocamento. A estaca foi modelada como “*wish in place*”, removendo os elementos de solo na área da estaca e substituindo por elementos de estaca. Sendo assim, os efeitos da instalação da estaca foram negligenciados.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



7 Apresentação dos resultados e análises

No cálculo de capacidade de suporte, buscou-se aplicar as recomendações dos autores originais dos métodos baseados em ensaio de cone (CPT), sem qualquer influência de coeficientes de ajustes ou recomendações práticas de outros autores.

Para a interpretação da carga de ruptura da prova de carga, adotou-se o método hiperbólico, proposto por Décourt (1998). Com o prolongamento da curva do ensaio, definiu-se como a carga de ruptura a partir do deslocamento equivalente a 10% do diâmetro da estaca.

Os resultados dos modelos implementados em elementos finitos (FEM), nas plataformas ABAQUS e PLAXIS, foram obtidos com base em correlações diretas com o ensaio de cone (CPT), sem implementação de ajustes nos parâmetros do modelo em elementos finitos. Segundo Lambe (1973), uma análise do tipo Classe C é aquela realizada após o evento que está sendo previsto ter ocorrido. A previsão do comportamento carga-deslocamento da estaca, após a realização do ensaio de prova de carga instrumentada, enquadra-se nesta classificação.

Na figura 7 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento, obtidas do ensaio de prova de carga estática (PCE) e resultados dos modelos de elementos finitos (FEM-Plaxis e FEM-Abaqus). Há também a indicação das cargas de ruptura obtidas dos métodos de previsão baseados no CPT e do critério de deslocamento equivalente a 10% do diâmetro da estaca.

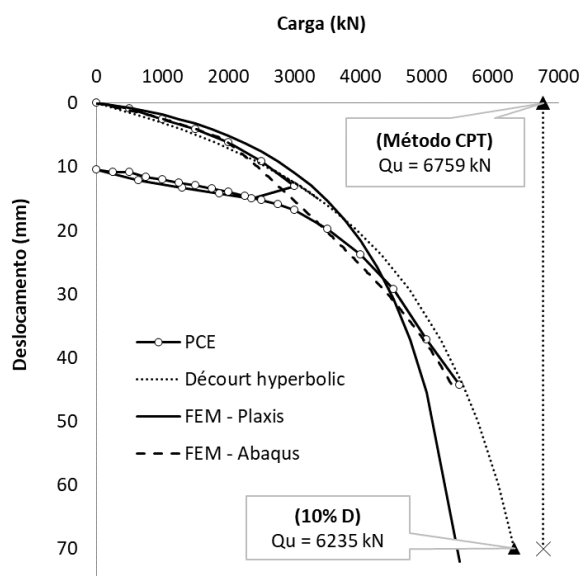


Figura 7. Curvas carga *versus* deslocamento.

As curvas do ensaio de prova de carga (PCE) e dos modelos numéricos (Plaxis e Abaqus) mostram uma excelente aproximação, evidenciando a capacidade de modelagem do problema através de ferramentas numéricas, quando da aplicação de bons parâmetros de entrada.

Na figura 8, os valores de carga lateral mobilizada no último estágio de carga do ensaio de prova de carga (PCE) estão lado a lado com a previsão de atrito máximo na ruptura, obtido pela

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



método baseado em ensaio de cone (CPT). Como o ensaio acabou não sendo levado até a suposta ruptura geotécnica, ainda haveria uma margem de aumento nas cargas laterais mobilizadas, ou seja, a previsão estaria ainda mais próxima do medido. Por meio da aplicação do modelo numérico, obteve-se a curva carga *versus* profundidade, cujo resultado reproduz uma excelente aproximação.

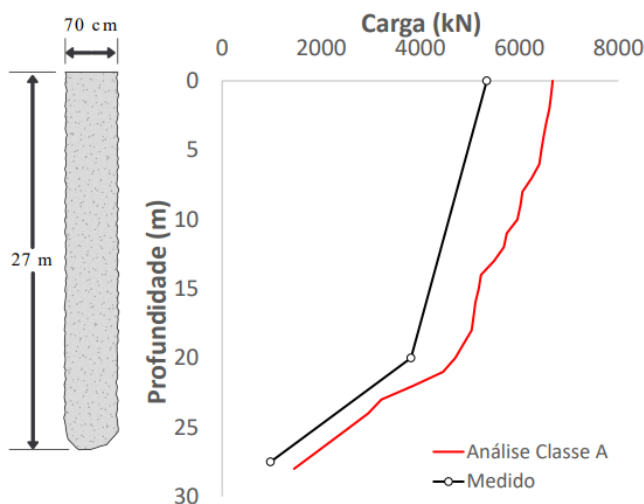
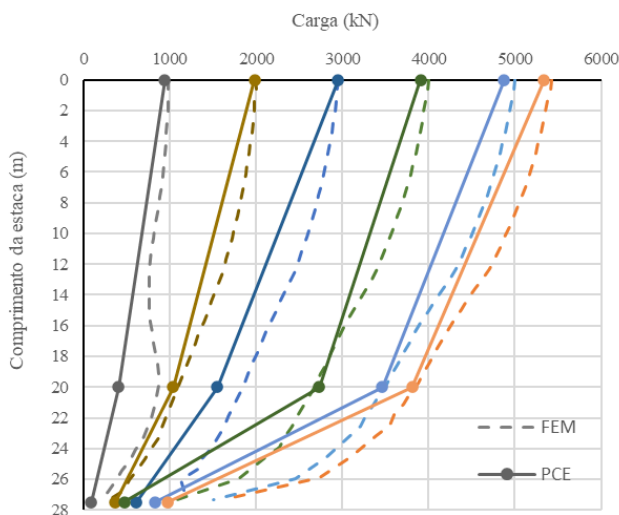


Figura 8. Carregamento máximo *versus* comprimento da estaca.

Na figura 9 são apresentadas as linhas de carga *versus* comprimento da estaca, onde as linhas contínuas representam os dados da prova de carga (PCE) e as linhas tracejadas são os resultados provenientes do modelo de elementos finitos (FEM - Abaqus).

As curvas geradas pelo modelo numérico (FEM-Abaqus) assemelham-se com as curvas medidas no ensaio de prova de carga, para os três níveis de instrumentação.



Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Figura 9. Curvas carga *versus* comprimento da estaca.

8 Conclusões

Foram apresentados os resultados do ensaio de prova de carga estática instrumentada (PCE), em uma estaca tipo hélice contínua monitorada (HCM), com diâmetro de 0,70 m e comprimento de 27,5 m.

O perfil geotécnico do terreno, caracterizado por depósito sedimentar marinho-eólico, foi definido a partir de uma campanha de investigação de campo composta por ensaios de cone (CPT). Foram implementados modelos numéricos, com a representação do perfil geotécnico do terreno e características da estaca teste. As análises realizadas levaram às seguintes considerações finais:

- A interpretação correta dos resultados da sondagem de cone (CPT) mostrou-se importante na definição dos valores dos parâmetros geotécnicos das camadas de solos. Em especial, em regiões com formação de depósito sedimentar, onde a presença de camadas de solos moles dificulta a determinação do índice de resistência do solo a partir da sondagem SPT.

- A definição dos valores dos parâmetros geotécnicos de cada camada de solo interfere nos resultados do modelo numérico. O uso da sondagem CPT, neste caso, mostrou-se adequado, visto a proximidade entre as curvas carga *versus* deslocamento do modelo numérico e o ensaio de prova de carga.

- A realização de ensaios de provas de carga instrumentadas, ainda realizadas em etapa de projeto, permitem a verificação do comportamento da estaca, bem como um melhor entendimento do mecanismo de transferência de carga. Tais resultados podem ser comparados com os modelos de previsão de cargas de ruptura e modelos de previsão de comportamento. A convergência dos modelos com os resultados dos ensaios geram a base de entendimento do comportamento de uma estaca individual, sendo utilizada então como base para a expansão de análise de grupos de estaca.

- Os métodos de previsão da capacidade de carga de estacas, baseados nos resultados de sondagem de cone (CPT), mostraram-se bastante próximos com a carga de ruptura obtida pelo prolongamento da curva do ensaio (método hiperbólico proposto por Décourt, 1998), considerando o critério de deslocamento equivalente a 10% do diâmetro da estaca.

- O ensaio de prova de carga estática instrumentada (PCE) deve ser incentivado na prática de engenharia de fundações, ainda na fase de projeto, como especifica a ABNT NBR 6122:2022. Embora a ABNT NBR 16.903:2020 permita o uso de manômetro e deflectômetros analógicos, para uma melhor confiabilidade das leituras, manutenção dos estágios de carga e aquisição dos dados, recomenda-se o uso de células de carga e deflectômetros digitais. É fundamental que o ensaio seja realizado por empresa com experiência em instrumentação.

- As curvas do ensaio de prova de carga (PCE) e dos modelos numéricos (Plaxis e Abaqus) mostram uma excelente aproximação, evidenciando a capacidade de modelagem do problema através de ferramentas numéricas, quando da aplicação de bons parâmetros de entrada.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 16.903: *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro, RJ, 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, RJ, 2022.

Bowles, J. E. (1997) *Foundation Analyses and Design*. 5. Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill.

Cintra, C. A., Aoki, N., Tsuha, C. H. C., e Giacheti, H. L. (2013) *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos*. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 144 p.

Cordeiro, R. E., Born, R. B. e Sales, L. F. P. (2016) *Avaliação de Métodos de Dimensionamento de Fundações Profundas Baseados em CPT*. Anais: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnicas, XVIII COBRAMSEG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Décourt, L. (1998). *Ruptura de Fundações e coeficientes de segurança a luz do Conceito de Rigidez*. In: Congresso Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, XI COBRAMSEG, Brasília: ABMS, 1998, v.3, p. 1599-1606.

Giacheti, H. L. (2013) *Fundações – Ensaio Estáticos e Dinâmicos*. São Paulo: Oficina de Textos.

Kulhawy, F H, and Mayne, P W. (1990) *Manual on estimating soil properties for foundation design*. United States: N. p., 1990. Web.

Lambe, T. W. (1973) *Predictions in soil engineering*. Géotechnique 23, N°. 2, p. 149 - 202.

Mayne, P. W. (2007) *NCHRP Synthesis 368 Cone Penetration Test*. Washington: TRB.

Robertson, P.K. and Cabal, K. L (2015)., *Signal Hill*, California: Gregg Drilling & Testing Inc, 2015.

Schnaid, F. (2000) *Ensaio de Campos: e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.

Terzaghi, K. Theoretical (1943) *Soil Mechanics*. Nova Iorque: John Wiley & Sons.

Viggiani, C.; Mandolini, A.; Russo, G. (2012) *Piles and Pile Foundations*. Nova Iorque: Spon Press.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

