

Avaliação dos Métodos de Previsão de Capacidade de Carga de Estacas Baseados no Ensaio de Cone Penetration Test

Naloan Coutinho Sampa

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, naloan2008@hotmail.com

Fernando Schnaid

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, fschnaid@gmail.com

RESUMO: Os métodos de previsão de capacidade de carga baseados em resultados de ensaios de *Cone Penetration Test* (CPT) são largamente utilizados no meio geotécnico para prever capacidade de carga de estacas isoladas. O presente artigo apresenta uma análise comparativa entre os resultados de 22 provas de carga executadas em estacas e os resultados previstos pelos métodos baseados em resultados de CPT. Os resultados das 22 provas de carga extraídas na literatura incluem os resultados das provas de carga executadas no Campo Experimental de Araquari/SC. A partir da análise dos resultados, é possível concluir que os métodos utilizados prevêem resultados com pouca dispersão, dentro da faixa estabelecida de mais ou menos 20%. Em vários casos, verificou-se que os resultados estão a favor da segurança, em conformidade com o caráter ligeiramente conservador deste tipo de abordagem.

PALAVRAS – CHAVE: Provas de Carga, Métodos de Previsão, Fundação Profunda, Cone Penetration Test, Capacidade de Carga.

1 INTRODUÇÃO

Elevadas cargas nas estruturas e as condições geotécnicas do solo da fundação exigem um melhor entendimento do comportamento da interação solo-estrutura. A maioria dos métodos utilizados para prever o comportamento das estacas apresenta resultados conservadores em função de vários fatores que influenciam o comportamento estaca-solo. Como solução para diminuir o elevado nível de conservadorismo observado nos projetos de dimensionamento de fundação, Fellenius (1980) alegou a necessidade da formulação de um método de previsão baseado em métodos racionais tal que o valor obtido pudesse ser sistematicamente replicado por diferentes intérpretes. Vários métodos foram formulados a partir das correlações dos resultados de provas de carga realizadas no campo com os resultados dos ensaios de SPT, CPT/CPTu ou DMT. A precisão desses métodos está fortemente ligada

à representatividade (quantidade e qualidade) de dados utilizados nas suas formulações.

Para Costa (2013), a escolha dos métodos de previsão deve ser feita cuidadosamente, tendo em conta que a previsão da deformabilidade e da resistência do solo são principais objetivos nos projetos de dimensionamento.

A utilização de CPT e CPTu na investigação geotécnica vem ganhando espaço em função da sua simplicidade, relativamente econômico, e em função das grandezas (q_c , f_s , U , v_s) obtidas em um só ensaio de cravação, de uma forma contínua com a profundidade, e que são interpretáveis com bases empíricas e analíticas, oferecendo melhorias aos processos de interpretação e as correlações para os parâmetros geotécnicos, de acordo com Eslami e Fellenius (1995), Schnaid (2005) e Mayne (2005).

Consideram-se o método LCPC (Bustamante e Frank, 1999) e o método apresentado no Eurocode 7 como os principais métodos baseados em resultados de CPT para

prever a capacidade de carga de estacas isoladas. Com relação ao método do Eurocode 7, tem-se outras duas vertentes: o método de Ruiters e Beringer (1979) no qual o Eurocode 7 é baseado e o método de Eurocode 7 atualizado por Lakatos (2011).

2 MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DA ESTACA BASEADOS NOS ENSAIOS DE CPT

A capacidade de carga de uma estaca isolada, (Q_{ult}) é usualmente calculada de acordo com a Equação 1.

$$Q_{ult} = Q_{s;ult} + Q_{b;ult} \quad (1)$$

As Equações 2 e 3 permitem calcular a capacidade de carga lateral ($Q_{s;ult}$) e de ponta ($Q_{b;ult}$) de uma estaca isolada.

$$Q_{s;ult} = \pi D \sum_{i=1}^n q_{s,i} \Delta l_i \quad (2)$$

$$Q_{b;ult} = \frac{\pi D^2}{4} q_b \quad (3)$$

onde: D é o diâmetro da estaca, em m; $q_{s,i}$ é a resistência unitária lateral na camada i , em kN/m^2 ; q_b é a resistência unitária da ponta, em kN/m^2 ; Δl_i é a espessura da camada i , em m; e n é o número de camadas.

Os ensaios de CPT fornecem medidas de resistência de cone q_c e atrito lateral (f_s) que são utilizadas para estimar a capacidade de carga última de uma estaca. É preferível calcular as resistências laterais últimas das estacas com base em q_c do que em f_s pelo fato das medidas de q_c serem mais precisas e mais facilmente interpretadas (MEIGH, 1987).

A forma geral para determinar as resistências lateral e de ponta de acordo com os resultados de ensaios de CPT é apresentada nas Equações 4 e 5.

$$q_b = c_b q_{cb} \quad (4)$$

$$q_{s,i} = c_{s,i} q_{cs,i} \quad (5)$$

onde: c_b e $c_{s,i}$ são constantes que dependem do tipo da estaca e do tipo de solo; q_{cb} é a resistência de cone representativo da base da estaca; e $q_{cs,i}$ é a resistência de cone representativo da camada i .

De uma forma resumida, os itens 3.1 a 3.4 apresentam os métodos de previsão empregados neste trabalho.

3.1 Ruiters e Beringer (1979)

Ruiters e Beringer propuseram em 1979 um método para previsão de capacidade de carga de estacas que leva em conta somente o tipo de solo, ficando indiferente ao tipo de estaca. Em argilas, a resistência unitária da ponta e lateral da estaca e a resistência ao cisalhamento não drenada da argila (S_u) são calculadas de acordo com as Equações 6 a 8, respectivamente.

$$q_b = \left[\frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} \right] \leq 15 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$q_s = \alpha S_u^{lateral} \quad (7)$$

$$S_u^{ponta} = \frac{q_c}{N_k} \therefore S_u^{lateral} = \frac{q_c^{lateral}}{N_k} \quad (8)$$

Para solos arenosos, foi proposta a utilização das Equações 9 e 10 para calcular a resistência de ponta e lateral, respectivamente.

$$r_p = N_c S_u^{ponta} \leq 15 \text{ MPa} \quad (9)$$

$$q_s = \min \begin{cases} f_s \\ q_c/300 \text{ (compressão)} \\ q_c/400 \text{ (tração)} \\ 120 \text{ kPa} \end{cases} \quad (10)$$

Segundo Eslami e Fellenius (1995), existe considerável incerteza nos resultados quando se calcula S_u através da resistência de cone, para depois utilizar esse valor de S_u na previsão das resistências de ponta e lateral da estaca.

3.2 Eurocode 7

A Eurocode 7 apresenta um melhoramento do método de Ruiters e Beringer (1979). O método do Eurocode 7 permite estimar q_s e q_b levando em conta o tipo de solo e as características das estacas.

As Equações 11 e 12 fornecem expressões que permitem calcular a máxima resistência da base e lateral de uma estaca isolada.

$$q_b = 0,5\alpha_p\beta_s \left[\frac{q_{c;I,média} + q_{c;II,média}}{2} + q_{c;III,média} \right] \leq 15MPa \quad (11)$$

$$q_s = \alpha_s q_{c;z;a} \quad (12)$$

3.3 Lakatos (2011)

A partir de ensaios de provas de carga em estacas realizadas em solos de Bulgária, Lakatos (2011) sugeriu a correção de alguns fatores do método Eurocode 7.

Com relação à capacidade de carga da ponta, Lakatos (2011) manteve a expressão proposta no Eurocode 7, porém sugeriu a correção dos valores de fator de classe de estaca para estacas que possuem pontas em estratos granulares.

Para calcular os valores de q_s , Lakatos (2011) recomendou a Equação 13 para solos granulares e a Equação 14 para solos coesivos.

$$q_{si;g} = \min(\alpha_{s;g}\sqrt{q_{c;i;média}}; q_{s;máx}) \quad (13)$$

$$q_{si;c} = \min(1,2\alpha_{s;c}\sqrt{q_{c;i;média}}; q_{s;máx}) \quad (14)$$

3.4 LCPC (BUSTAMANTE E FRANK, 1999)

Bustamante e Frank (1999) melhoraram o método desenvolvido por Bustamante e Ganeselli (1982), apresentando o método atualmente conhecido por LCPC (*Laboratoire central des ponts et chaussées*). Na metodologia proposta, a resistência da ponta de estaca e a resistência lateral unitária da estaca em cada camada de solo são calculadas de acordo com as Equações 15 e 16, respectivamente.

$$q_b = k_c q_{ce} \quad (15)$$

$$q_{s;i} = \min(q_c/k_s; q_{s;máx}) \quad (16)$$

Mais detalhes sobre os métodos utilizados neste trabalho podem ser obtidos nas bibliografias dos referidos métodos.

4 METODOLOGIA

Os resultados das 22 provas de carga utilizadas no presente artigo foram extraídos nos diversos trabalhos publicados nas literaturas nacional e internacional. Nessas 22 provas de carga executadas em estacas, tem-se: 7 em estacas escavadas, 5 em estacas ômega/hélice contínua, 5 em estacas metálicas cravadas e 5 em estacas pré-moldadas cravadas. As 22 provas de carga foram numeradas da seguinte forma: 1 a 7 para estacas escavadas, 8 a 12 para estacas ômega/hélice contínua, 13 a 17 para estacas pré-moldadas de concreto cravadas e 18 a 22 para estacas metálicas cravadas. As principais características dessas 22 provas de carga foram resumidas na Tabela 1.

As planilhas eletrônicas utilizadas para calcular os resultados previstos pelos métodos foram programadas no *software* Microsoft Excel versão 2010.

Tabela 1. Principais características das provas de carga utilizadas nesse trabalho.

Nº	Tipo de estaca	Diâm./C omp. (cm//m)	Tipo de solo
1	Escavada com polímero	100//24	Areia e argila
2	Escavada	30//7,85	Silte, argila e areia
3	Escavada	45//12	Argila e Silte argilosa
4	Escavada não apiloada	23//4,6	Argila, argila siltosa e areia
5	Escavada apiloada	26//4,2	Argila, argila siltosa e areia
6	Escavada com polímero	70//15	Areia e argila
7	Escavada com lama	100//24	Areia e argila
8	Ômega	39//12	Argila e Silte argilosa
9	Hélice Contínua	40//12	Argila e Silte argilosa
10	Hélice Contínua	80//14	Areia
11	Hélice Contínua	45//15	Areia
12	Hélice Contínua	60//17	Areia e argila
13	Pré-moldada de concreto	28,5 x 28,5//11	Areia
14	Pré-moldada de concreto	28,5 x 28,5//15	Areia
15	Pré-moldada de concreto	60//26	Areia e argila
16	Pré-moldada de concreto	28,5//12	Argila sitosa e areia com silte
17	Pré-moldada Protendida	18//14	Argila siltosa e silte arenosa
18	Tubo metálico	27,3//9	Areia e argila
19	Perfil H (HP 310×110)	34,9//17	Areia siltosa, argila siltosa, silte
20	Perfil H (HP 310×110)	34,9//17	Areia pedregulhosa
21	Steel Pipe Piles	60,9//36	Areia e argila
22	Steel Pipe Piles	60,9//36	Areia e argila

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma comparação direta entre os valores medidos nas provas de carga e os valores estimados pelos métodos, em função de tipos de estacas e de métodos utilizados, é apresentada nas Tabelas 2 a 4. Os espaços vazios verificados nas Tabelas 2 a 4 correspondem às estacas não instrumentadas.

Na Tabela 2 encontram-se resumidos os valores das resistências laterais medidas e estimadas pelos métodos.

Tabela 2. Comparação direta entre os valores das resistências laterais medidas e estimadas pelos métodos de previsão baseados nos resultados de CPT.

Estacas	Nº	Resistência lateral da estaca (kN)				
		PCE	R_B (1979)	E_C 7	Lakatos (2011)	LCPC
Escavadas	1	6610	1458	2318	3780	4037
	2	-	234	88	140	92
	3	-	1340	1407	817	584
	4	214	489	299	159	82
	5	253	489	321	171	82
	6	-	197	896	1269	1604
	7	3110	1458	2318	3780	4037
Ômega /Hélice	8	1229	1161	1219	885	367
	9	823	1191	1251	726	519
	10	1900	1667	1459	1373	1515
	11	1020	1012	998	926	1171
	12	-	1881	1803	1610	1247
Pré-moldadas	13	640	169	508	662	254
	14	1120	243	730	931	730
	15	1735	2151	4100	3665	2504
	16	810	827	802	709	546
	17	219	304	276	233	142
Metálicas	18	155	72	332	374	192
	19	-0	1447	1626	800	523
	20	633	210	503	466	474
	21	-	2004	4792	3360	2419
	22	3300	3262	6488	3858	3099

onde PCE é prova de carga estática; R_B é Ruiter e Beringer; E_C é Eurocode

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores medidos e estimados das resistências de ponta e últimas das estacas. Os métodos Eurocode 7 e Lakatos (2011) utilizam as mesmas expressões para estimar a resistência da ponta, razão pela qual os seus valores foram unificados nessa tabela.

Tabela 3. Comparação direta entre os valores das resistências de ponta medidas.

Estacas	Nº	Resistência de ponta da estaca (kN)			
		PCE	R_B (1979)	E_C 7/ Lakatos (2011)	LCPC
Escavadas	1	1990	4466	2864	3075
	2	-	41	81	19
	3	-	210	181	168
	4	116	75	66	91
	5	247	94	85	114
	6	-	3174	1616	1681
	7	1148	4466	2864	3844
Ômega /Hélice	8	199	157	181	163
	9	62	166	190	171
	10	2350	1966	2012	940
	11	680	1466	1022	707
	12	-	737	1360	706
Pré-moldadas	13	360	471	387	348
	14	480	571	468	301
	15	4050	3628	2236	773
	16	190	360	305	250
	17	43	44	53	18
Metálicas	18	335	426	350	231
	19	-	244	1038	151
	20	1091	1149	1130	245
	21	-	3113	2678	517
	22	2215	2302	2198	723

Tabela 4. Comparação direta entre os valores das resistências últimas medidas e estimadas.

Estacas	Nº	Resistência última da estaca (kN)				
		PCE	R_B (1979)	E_C 7	Lakatos (2011)	LCPC
Escavadas	1	8600	5924	5182	6644	7112
	2	270	275	168	221	110
	3	682	1550	1588	997	752
	4	330	564	365	225	173
	5	500	583	406	255	196
	6	2968	3371	2512	2886	3286
	7	4258	5924	5182	6644	7880
Ômega /Hélice	8	1428	1319	1400	1066	530
	9	885	1357	1441	916	690
	10	4250	3633	3471	3385	2455
	11	1700	2478	2020	1948	1878
	12	2597	2619	3163	2970	1953
Pré-moldadas	13	1000	641	894	1048	601
	14	1600	815	1198	1400	1031
	15	5785	5779	6337	5901	3278
	16	1000	1187	1107	1013	795
	17	262	348	329	286	160
Metálicas	18	490	499	681	724	423
	19	1839	1691	2664	1838	674
	20	1499	1359	1633	1595	719
	21	4150	5118	7469	6037	2935
	22	5515	5563	8685	6055	3822

As Figuras 1 a 4 apresentam gráficos de dispersão que correlacionam valores medidos e estimados da resistência última das estacas. Nessas figuras foram utilizadas três linhas diagonais, sendo que a linha do meio representa a linha de perfeita correlação entre os valores medidos e os valores calculados. As outras linhas apresentam um desvio de mais ou menos 20% em relação à linha de perfeita correlação. Segundo Eslami (1987), o desvio de mais ou menos 20% pode ser assumido como uma diferença aceitável nos casos de previsão de capacidade de carga das estacas.

Analisando os resultados em função de grupos de estacas e métodos de previsão, observa-se que para estacas escavadas (Figura 1), existe boa correlação entre as resistências medidas e estimadas. Os métodos LCPC e Lakatos (2011) apresentaram melhores correlações entre os valores das resistências últimas medidas e calculadas.

Nas estacas ôegas e hélice contínua (Figura 2), nota-se claramente que os métodos conseguiram estimar valores de resistência última dentro da faixa aceitável de variação. Observou-se melhores previsões das resistências últimas no método Lakatos (2011). O método LCPC mostrou-se conservador na estimativa da resistência última, e os dois métodos restantes estimaram razoavelmente as resistências últimas.

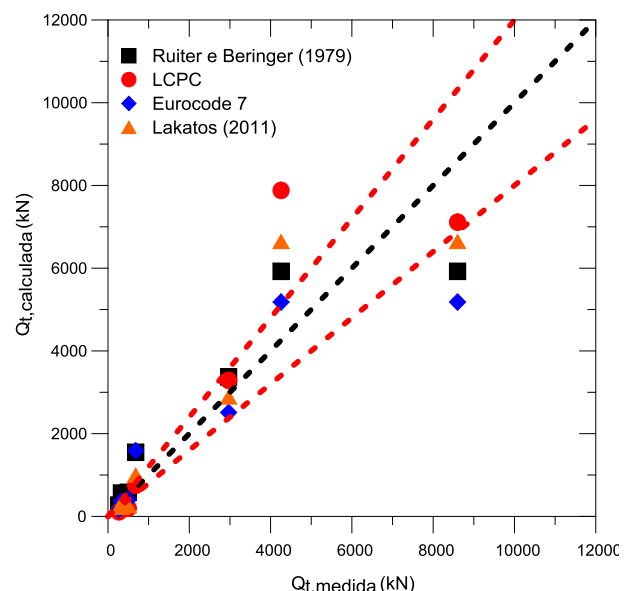


Figura 1. Carga última medida × carga última calculada – Estacas Escavadas.

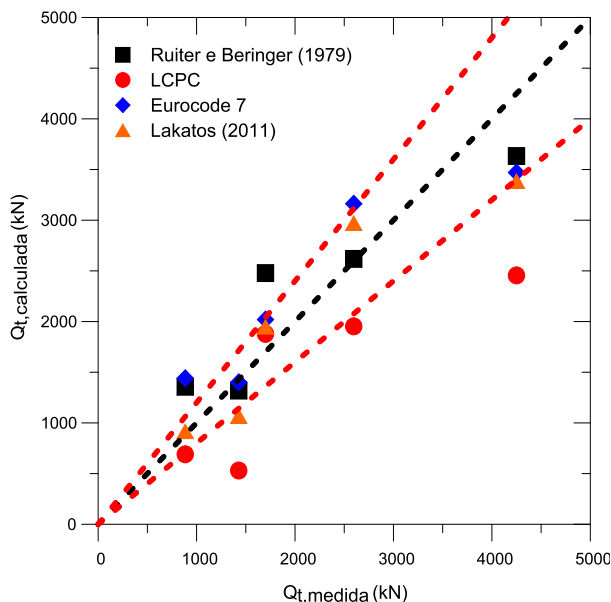


Figura 2. Carga última medida × carga última estimada – Estacas Ômega e Hélice Contínua.

Nas estacas pré-moldadas (Figura 3), com exceção do método LCPC que subestimou os valores das resistências últimas, os restantes métodos apresentaram boas correlações entre os valores das resistências últimas calculadas e medidas. Porém, o método Lakatos (2011) mostrou-se ideal para estimar os valores das resistências últimas, por apresentar os valores estimados dentro da faixa estipulada.

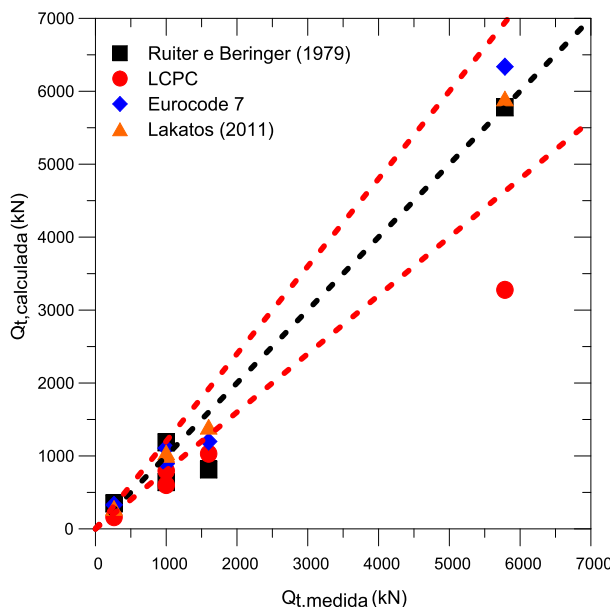


Figura 3. Carga última medida × carga última estimada – Estacas Pré-moldadas.

Com relação às estacas metálicas (Figura 4), os métodos Ruiter e Berinter (1979) e Lakatos

(2011) apresentaram melhores correlações entre os valores das resistências últimas medidas e estimadas. O método Eucocode 7 superestimou os valores das resistências últimas, ao passo que o método LCPC atuou a favor de segurança.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se observar que em muitos casos os métodos fizeram uma compensação dos erros observados nos valores estimados das resistências laterais e de ponta, apresentando uma boa correlação entre os valores de resistências últimas estimadas e medidas. A compensação desses erros pode suscitar interrogações sobre a precisão na separação das parcelas de resistência de ponta e lateral em estacas instrumentadas.

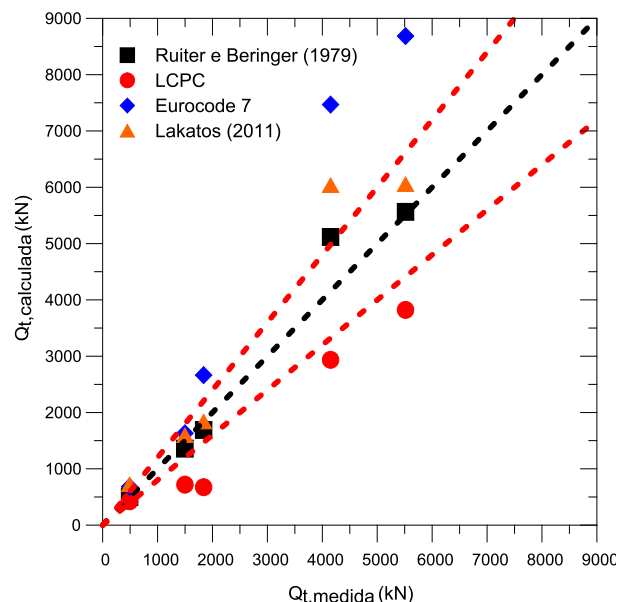


Figura 4. Carga última medida × carga última estimada – Estacas Metálicas.

Devido às incertezas quanto ao desempenho efetivo de ponta de alguns tipos de estacas, várias normas de fundações limitam a magnitude da parcela de ponta com objetivo de preservar a segurança. A Tabela 5 apresenta os resultados médios da razão entre a resistência de ponta estimada e a resistência última estimada ($\frac{\bar{q}_b}{q_t}$).

Tabela 5. Razão entre as resistências estimadas de ponta e última.

Método de previsão da capacidade de carga	Estacas escavadas	Estacas ômega e hélice contínua	Estacas pré-moldadas	Estacas metálicas
	$\frac{\bar{q}_b}{\bar{q}_t}$	$\frac{\bar{q}_b}{\bar{q}_t}$	$\frac{\bar{q}_b}{\bar{q}_t}$	$\frac{\bar{q}_b}{\bar{q}_t}$
Ruiter e Beringer (1979)	0,43	0,33	0,50	0,57
Eurocode 7	0,44	0,36	0,32	0,44
Lakatos (2011)	0,39	0,39	0,31	0,51
LCPC	0,41	0,34	0,30	0,30

Dependendo do tipo de estaca e do método utilizado para previsão, observou-se uma variação de 30 a 57% da razão entre a resistência de ponta calculada e resistência última calculada.

6 CONCLUSÕES

Os métodos de previsão baseados nos resultados de ensaios de CPT estão sendo utilizados cada vez mais devido ao crescente uso de CPT nas investigações geotécnicas.

A partir de uma análise comparativa, observou-se uma boa correlação entre os valores medidos e os calculados pelos métodos, embora os resultados das provas de carga extraídas na literatura possuem métodos e critérios diferentes para as suas determinações. O método Eurocode 7 atualizado pelo Lakatos (2011) apresentou melhores correlações, enquanto que o método LCPC foi o mais conservador.

Pode-se levantar interrogações quanto à precisão na separação das parcelas de ponta e atrito lateral nas estacas instrumentadas, uma vez que os resultados mostraram que as previsões das resistências últimas são mais realistas que as previsões das resistências lateral e de ponta quando são comparadas com os valores das resistências medidas nas provas de carga.

REFERÊNCIAS

Bustamante, M. e Gianceselli, L. *Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetrometer CPT*. Proceedings, 2nd European Symposium on

Penetration Testing, Vol. 2, 493-500, 1982.
 Bustamante, M. e Frank, R. *Current French design practice for axially loaded piles*. Ground engineering, 38-44, 1999.
 Eslami, A. e Fellenius, B. H. *Toe Bearing Capacity of Piles from Cone Penetration Test (CPT) Data*. International Symposium on Cone Penetrometer Testing, CPT '95, Linköping, Sweden, October 4 - 5, 1995.
 Eslami, A.; Fellenius, B. H. *Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories*. Canadian Geotechnical Journal. No 34, 1997.
 EUROCODE 7. *Geotechnical design Part 3: Design assisted by field testing*. July 1999.
 Laccasse, S. e Nadim, F. 1994. *Reliability issues and future challenges in geotechnical engineering for offshore structures*. Publicação NGI, No 191, p. 1- 30.
 Lakatos, I. *Cölöpalapok méretezése az Eurocode 7 követelményei szerint*. PhD Thesis, BME. Budapest, Hungary. (in Hungarian), 2011.
 Mayne, P.W. 2005. *Integrated ground behavior: In-situ and laboratory tests*. Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 2 (Proc. Lyon, France), Taylor & Francis, London: 155 – 177.
 Meigh, A.C. *Cone penetration testing methods and interpretation*. CIRIA Ground Engineering Report: In-Situ Testing, Construction Industry Research and Information Association, Butterworths, London, 1987.
 Ruiter, J. e Beringen, F.L. *Pile foundations for large North Sea structures*. Marine Geotechnology, 1979.
 Schnaid, F. 2005. *Geocharacterization and engineering properties of natural soils by in-situ tests*. Proc., 16th ICSMFE Vol. 1, Osaka, Millpress, Rotterdam: 3 – 45.