

Avaliação de Métodos de Dimensionamento de Fundações Profundas Baseados em CPT

Renan Eduardo Cordeiro,
BornSales Engenharia, Baln. Camboriú, Brasil, renan@bornsalaes.com.br

Ricardo Bergan Born, M.Sc.
UFRGS, BornSales Engenharia, Baln. Camboriú, Brasil, ricardo@bornsales.com.br

Luis Fernando Pedroso Sales, M.Sc.
UNIVALI, BornSales Engenharia, Baln. Camboriú, Brasil, luis@bornsales.com.br

RESUMO: 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 dimensionamento é através da utilização de métodos semi-empíricos, os quais correlacionam a resistência de ponta (q_b) e a resistência por atrito lateral (q_s) com dados retirados de ensaios de campo. Sua previsão com acurácia é de difícil realização, 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 do ensaio de campo. 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. Uma breve análise é realizada, através da avaliação de 6 métodos semi-empíricos de dimensionamento de fundações profundas baseados em ensaio de cone, comparando-os com um banco de dados de resultados de 26 provas de carga estática, realizados em solos de diferentes características. Os resultados da comparação dos valores medidos e calculados apontaram valores de coeficientes de determinação R^2 acima de 0,9, com poucos casos de dispersão excessiva.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações Profundas, Métodos Semi-Empíricos, CPT, Capacidade de Carga, Prova de Carga.

1 INTRODUÇÃO

Nenhum método é capaz de obter a capacidade real de carga para uma fundação, apenas uma estimativa. Uma boa prática de dimensionamento de fundações compreende utilizar mais de um método de dimensionamento. (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.

No ensaio de cone o procedimento de investigação é rápido e não sofre grandes influências do operador, pois registra dados continuamente de forma automática. (SCHNAID, 2000; MAYNE, 2007). Com os dados adquiridos podem ser feitas correlações chegando a diversos parâmetros, como densidade relativa (D_r), do histórico de tensões (OCR), da sensibilidade (S_t), do índice de vazios (e), resistência não drenada (S_u), entre outros. Além destes parâmetros alguns métodos de dimensionamento de fundações utilizam relação direta do resultado do ensaio com a capacidade de carga das estacas. (MAYNE, 2007; GIACHETI, 2013).

Foram avaliados seis métodos semi-empíricos de dimensionamento de fundação profunda, baseados em sondagem CPT: ICP-05, UWA-05, NGI-05, FUGRO-05, LPC-13 e API-00. Para esta avaliação, foram utilizados resultados de provas de cargas estáticas presentes em publicações internacionais.

2 CAPACIDADE DE CARGA

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 1).

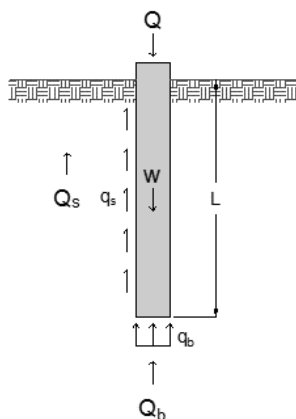


Figura 1. Esquema de capacidade de carga

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

Na equação Q_{ult} é a carga de ruptura, A_b é a área da base da estaca, q_b é a resistência unitária na base da estaca, U é o perímetro, L é o comprimento da estaca e q_s é a resistência por atrito lateral unitário da estaca. (TERZAGHI, 1943; VIGGIANI; MANDOLINI; RUSSO, 2012).

3 MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS

Os métodos semi-empíricos de dimensionamento de fundação, vem de uma mistura do racionalismo com o empirismo,

trazendo como base a teórica clássica, unindo com a prática de campo e laboratório. (CODUTO, 2000). Os métodos presentes neste artigo possuem formulações particulares, presentes nas publicações originais, onde pôr fim resultam em valores de resistência de ponta unitária (q_b) e resistência por atrito lateral unitária (q_s).

3.1 Método ICP-05

O método ICP-05 (*Imperial College Pile*) foi desenvolvido no *Imperial College* de Londres e publicado no ano 2005. O desenvolvimento do método foi a partir de um banco de dados de estacas cravadas em diversos campos de pesquisa incluindo vários tipos de solo diferentes e com sondagem CPT. (JARDINE; et al, 2005).

3.2 Método UWA-05

O método UWA-05 (*University of Western Australia Method*) foi desenvolvido na *University of Western Australia* em Perth e publicado no ano 2005. Foi desenvolvido a partir de dados retirados de provas de carga estática em estacas cravadas acompanhadas de sondagem CPT. Foi publicado separadamente para areia em Lehane et al. (2005) e argila em Lehane et al. (2013).

3.3 Método NGI-05

O método NGI-05 (*Norwegian Geotechnical Institute*) foi desenvolvido no *Norwegian Geotechnical Institute* em Oslo e publicado no ano 2005. Este método foi baseado no método API-93, propondo algumas alterações e principalmente propondo correlações para os parâmetros que julgam fundamentais para uma boa previsão da capacidade de carga. O banco de dados utilizado para criação do método é baseado em estacas cravadas em diferentes tipos de solo, como alguns ensaios são muito antigos, só possuem sondagem SPT. Os autores propuseram uma correlação para acrescentá-los ao banco de dados, mas a maioria dos ensaios foram acompanhados de sondagem CPT. (CLAUSEN; AAS; KARLSRUD, 2005; KARLSRUD; CLAUSEN; AAS, 2005).

3.4 Método FUGRO-05

O método Fugro-05 foi desenvolvido pela Fugro que é umas das maiores empresas do mundo na área de geotecnia, localizada em Leidschendam na Holanda, onde foi publicado o método no ano 2005. Este método tenta evoluir o método API-93 com um novo banco de dados em estacas cravadas em diferentes locais com sondagem CPT. (KOLK; VELDE, 1996, KOLK; BAAIJENS, 2005).

3.5 Método API-00

O método API-00 foi desenvolvido pelo *American Petroleum Institute* em Houston, onde foi publicado o método no ano 2000. Foi desenvolvido para estacas cravadas cilíndricas metálicas, com o intuito de dimensionar fundações para plataformas de petróleo em alto mar. (API, 2000).

3.6 Método LPC-13

O método LPC-13 (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) é uma atualização do método desenvolvido por Bustamante e Gianceselli (1982), que foi atualizado por Bustamante e Frank (1997) e por último atualizado por Frank em 2013, método este que compõe a norma francesa. (BUSTAMANTE; GIANESELLI, 1982; BUSTAMANTE; FRANK, 1997; FRANK, 2013).

4 BANCO DE DADOS

Para a elaboração do banco de dados de provas de carga fez-se uma extensiva busca em referências bibliográficas. A escolha das provas de carga era condicionada às mesmas serem realizadas em locais onde a investigação geotécnica fosse do tipo CPT. Como a experiência brasileira ainda é pequena com investigação do tipo CPT, a busca por referências internacionais fez-se necessário, principalmente em publicações de congressos de engenharia de fundações e geotecnia.

A avaliação dos métodos é composta por 26 ensaios de prova de carga estática, 9 ensaios em estacas Hélice Contínua, 9 ensaios em estacas

Pré-Moldada de Concreto e 8 ensaios em estacas Metálicas.

Para cada prova de carga selecionada, tem-se uma publicação original dos autores, o que qualifica os resultados encontrados dos ensaios. Por se tratarem de publicações relacionadas em sua maioria a campos experimentais, é comum estar associado a um tipo de solo predominante, evitando perfis estratificados.

5 METODOLOGIA

Para cada prova de carga, identificou-se o local do ensaio, o tipo de estaca teste e suas dimensões, o perfil predominante de solo, a resistência média do solo e a tensão vertical efetiva do solo.

Para a interpretação da carga de ruptura das provas de carga, adotou-se o método proposto por Aoki (2013). A definição de um modelo de interpretação da carga de ruptura é importante, pois condiciona as análises de previsões dos métodos aplicados, para um único referencial de interpretação das provas de carga.

No cálculo de capacidade de suporte para cada método, buscou-se aplicar as recomendações dos autores originais dos métodos, sem qualquer influência de coeficientes de ajustes ou recomendações práticas de outros autores.

Para análise dos resultados, produziu-se uma tabela de cunho aritmético e outra de cunho estatístico, com os resultados obtidos analisou-se a média, desvio padrão, coeficiente angular e coeficiente de determinação, para esclarecer as características de cada método avaliado.

6 RESULTADOS

Na tabela 1 tem-se uma compilação dos resultados das previsões de capacidade de carga por cada método aplicado, observando os valores da relação entre a carga prevista (método) e a carga de ruptura medida no ensaio (PCE).

Valores médios acima de 1,00 indicam que as previsões pelos métodos ficaram acima dos valores medidos nos ensaios de prova de carga. Os valores de desvio padrão, indicam a variabilidade de cada método. Observa-se que aplicando os desvios padrões nos valores

médios, praticamente todos os métodos de previsão alternam valores acima e abaixo das medições de ruptura das estacas nas provas de carga.

Tabela 1. Resultados Cálculos Aritméticos

Método de Previsão	Cálculos Aritméticos Carga Prevista / Medida	
	Média	Desvio Padrão
ICP-05	0,91	0,30
LPC-13	1,08	0,35
NGI-05	0,98	0,43
UWA-05	1,23	0,33
FUGRO-04	1,30	0,55
API-00	1,26	0,59

Para apresentar graficamente o banco de dados foi utilizado o valor limite de 10000kN ou 10MN, valor que compreende 84% dos dados obtidos, esta consideração foi feita para que ficasse visível a escala do gráfico, caso contrário os pontos ficariam agrupados no terço inferior do gráfico.

Nas séries de gráficos a seguir (figura 2 a figura 7), estão plotados a Carga Medida x Carga Prevista, a linha continua representa o valor absoluto das cargas de rupturas dos ensaios de prova de carga, enquanto as linhas tracejadas representam a carga de ruptura multiplicada por 2 e dividida por 2.

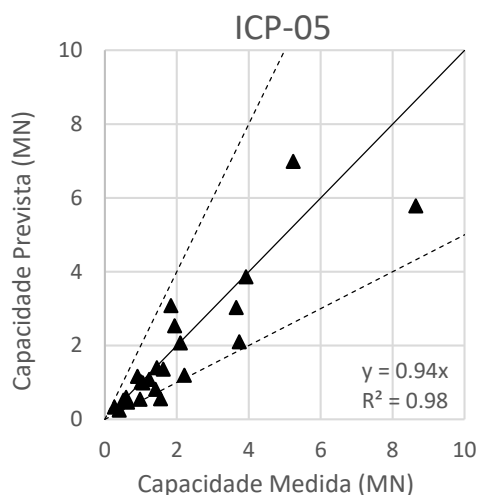


Figura 2. Carga Medida x Prevista - ICP-05

Na tabela 2 tem-se os valores de coeficiente angular e coeficiente de determinação, obtidos da análise de regressão linear em cada um dos métodos estudados.

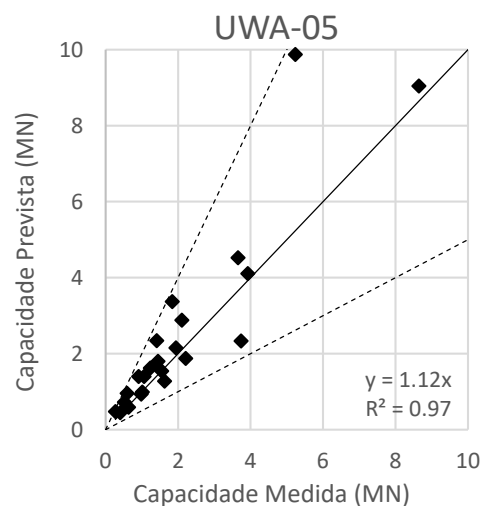


Figura 3. Carga Medida x Prevista - UWA-05

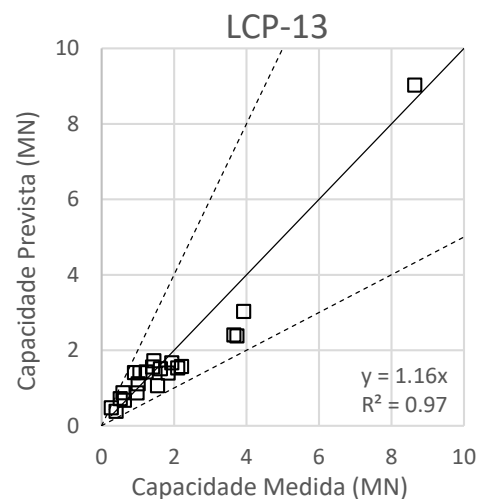


Figura 4. Carga Medida x Prevista - LPC-13

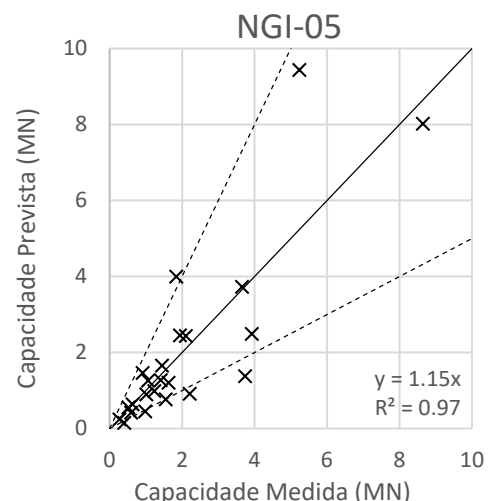


Figura 5. Carga Medida x Prevista - NGI-05

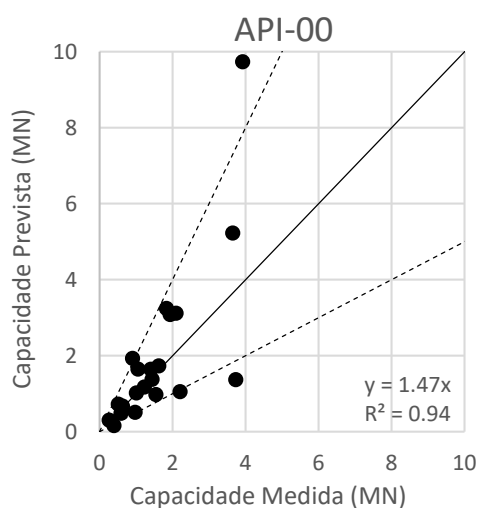


Figura 6. Carga Medida x Prevista - API-00

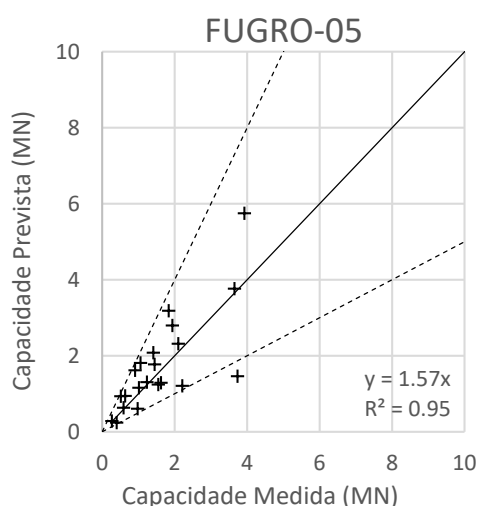


Figura 7. Carga Medida x Prevista - FUGRO-05

Tabela 2. Resultados Regressão Linear

Método de Previsão	Regressão Linear	
	Coef. Angular	Coef. de Determinação
ICP-05	0,94	0,98
LPC-13	1,16	0,97
NGI-05	1,15	0,97
UWA-05	1,12	0,97
FUGRO-04	1,57	0,95
API-00	1,47	0,94

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A performance dos métodos está expressa em forma de ranque (tabela 3). Para determinação do ranque com base nos cálculos aritméticos (R1), foi subtraído a média de 1 e seu módulo somado ao desvio padrão. No critério estatístico, o

melhor método é aquele que apresenta coeficiente angular mais próximo a 1,00, com o coeficiente de determinação mais próximo a 1,00. A partir dos resultados dos ranques R1 e R2, pode-se elaborar um índice de ranque (IR), que busca representar a performance de cada método.

Tabela 3. Ranque

Método de Previsão		ICP 05	LPC 13	NGI 05	UWA 05	API 00	FUGRO 05
Cálculos Aritméticos	$\bar{X}$	0,91	1,08	0,98	1,23	1,26	1,30
	σ	0,30	0,35	0,43	0,33	0,59	0,55
	R1	1	2	3	4	5	5
Regressão Linear	m	0,94	1,16	1,15	1,12	1,47	1,57
	r^2	0,98	0,97	0,97	0,97	0,94	0,95
	R2	1	4	3	2	5	6
Performance	R	2	6	6	6	11	12
	R	1	2	2	2	5	6

Onde: $IR = R1 + R2$

O método ICP-05 mostrou-se pouco disperso frente as provas de carga, demonstrando o melhor desempenho tanto na análise estatística quanto na análise aritmética. A fusão de conceitos teóricos e análise empírica neste método ficam bastante evidentes na sua formulação. Muitas vezes esta fusão não obtém o sucesso esperado, mas neste caso as variáveis principais conseguem ser extraídas com boa precisão do ensaio de cone. Outras variáveis que não podem ser extraídas do ensaio estão presentes no método, onde para determiná-las foi criado um banco de dados suficientemente grande no qual permite chegar aos parâmetros de ângulo de atrito da interface com precisão suficiente para previsão de capacidade carga.

No método LPC-13 fica evidente a característica empírica do método, onde o casamento entre os dados de entrada do ensaio de cone e os coeficientes empíricos resultam previsão de capacidade de carga muito boa. A

grande variedade de tipos de solo e tipos de estaca é suficiente para abranger os casos aqui estudados.

O método NGI-05 é composto também por características teóricas com coeficientes empíricos. Os parâmetros geotécnicos que não são extraídos diretamente do ensaio de cone, são de correlações reconhecidas e para variável de maior influência, densidade relativa, foi proposta uma correlação pelo próprio método, na média os resultados foram satisfatórios, porém apresentaram um desvio padrão alto.

O método UWA-05 apresenta uma formulação similar ao ICP-05 quanto a previsão em areia, porém se difere para argila. Aparentemente apresenta valores empíricos que resultam em previsões que superestimam a capacidade de suporte.

No método API-00 fica nítido uma grande dispersão dos resultados refletido no coeficiente de determinação e desvio padrão, além de uma tendência de superestimar os valores de capacidade de suporte. Isso porque método foi desenvolvido para estacas metálicas *offshore*, normalmente utilizado para fundação de plataformas de petróleo, para a utilização deste método o ideal seria obter valores adequados dos parâmetros utilizados, um parâmetro de grande influência é o ângulo de atrito estaca solo que na tabela proposta pelo método estão expostos valores referentes a estacas metálicas vazadas, outro parâmetro importante é o N_q , presente também no métodos teóricos, o fato de ele ser muito sensível no método e sua variação ser grande faz com que torne difícil sua aplicação.

O método FUGRO-05 apresenta um comportamento muito parecido ao método API-00, também desenvolvido para estacas metálicas, foi uma tentativa de aprimora-lo, com um novo banco de dados e algumas formulações diferente baseados em regressão linear procurando uma melhor reta.

8 CONCLUSÕES

Cabe ressaltar a importância da utilização de mais de um método de dimensionamento. Afinal uns responderam melhor que outros nas simulações, porém nenhum método é perfeito, cada método traz uma estimativa, sendo ideal a comparação entre diferentes métodos.

Frente aos resultados obtidos, é possível trabalhar diretamente com os métodos ICP-05, LCP-13, NGI-05 e UWA-05, devido a qualidade dos resultados obtidos nos dimensionamentos. Aos métodos API-00 e FUGRO-05 é necessária maior atenção, pois tiveram uma resposta pior. Porém cabe a todos uma calibração com dados locais para chegar cada vez mais perto a estimativa, da realidade.

Fica nítido que a utilização da sondagem do tipo CPT traz maior confiança quanto a aquisição dos dados. Não há influência direta do operador, assim diminui-se o “erro” humano. Ainda, o equipamento em si, o qual é dotado de células de carga, apresenta uma leitura confiável, e quase constante ao longo da profundidade cravada.

As variáveis de entrada como tipo de solo, tipologia de estaca, diâmetro e comprimento, não demonstraram correlação específicas para os métodos estudados. Ou seja, os métodos responderam igual para as diferentes variáveis de entrada apresentadas, não houve um padrão de comportamento, que pudesse avaliar um método como bom apenas para um tipo de solo ou para estacas de grande ou pequeno diâmetro, curtas ou longas.

Os métodos ICP-05, UWA-05, NGI-05, FUGRO-05, e API-00 foram desenvolvidos através de bancos de dados de estacas cravadas. Neste trabalho, utilizou-se sua formulação para avaliação de estacas com outras naturezas de execução, tais como estacas escavadas, e estacas hélice contínua. Tal fator pode ter influenciado a gama de resultados, embora na maioria dos casos, os resultados calculados mostrem um bom acordo com medido.

A aliança entre a segurança e a economia é o que move a engenharia. A busca pela utilização de técnicas de investigação de solo mais confiáveis, a exemplo do ensaio de cone, aliados a metodologias de cálculo para dimensionamento de fundações baseados nos dados deste ensaio, parecem com uma tendência a ser seguida.

REFERÊNCIAS

- Aoki, N. (2013) Fundações – Ensaio Estáticos e Dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos.
- API RP2a-WSD, 2000. (2000) Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms. 21. ed. Washington DC.

- Bowles, J. E. (1997) *Foundation Analyses and Design*. 5. Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill.
- Bustamante, M. e Frank, R. (1997) Design of Axially Loaded Piles – European practice. In: ERTC SEMINAR, 3., 1997, Brussels. Proceedings. Balkema: Rotterdam, p. 161-175.
- Bustamante, M. e Gianselli, L. (1982) Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 2., 1982, Amsterdam. Proceedings. London: Taylor & Francis Group, p. 493-500.
- Clausen, C. J. F.; Aas, P. M. e Karlsrud, K. (2005) Bearing capacity of driven piles in sand, the NGI approach. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRONTIERS IN OFFSHORE GEOTECHNICS, 1., 2005, Perth. Proceedings. London: Taylor & Francis Group, p. 677-681.
- Coduto, D. P. (2001) *Foundation design: principles and practices*. 2. ed. Nova Jersey: Prentice Hall.
- Frank, R. (2013) *Calcul des fondations profondes selon la NF P 94-262*. Paris. Digitado.
- Giacheti, H. L. (2013) *Fundações – Ensaios Estáticos e Dinâmicos*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Jardine, R.; Chow, F. e Overy, R.; Standing, J. (2005) *ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays*. Londres: Thomas Telford Publishing.
- Karlsrud, K.; Clausen, C. J. F. e Aas, P. M. (2005) Bearing capacity of driven piles in clay, the NGI approach. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRONTIERS IN OFFSHORE GEOTECHNICS, 1., 2005, Perth. Proceedings. London: Taylor & Francis Group, p. 775-782.
- Kolk, H. J. e Baaijens, A. E. Design criteria for pipe piles in silica sands. (2005) In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRONTIERS IN OFFSHORE GEOTECHNICS, 1., 2005, Perth. Proceedings. London: Taylor & Francis Group, p. 711-716.
- Kolk, H. J. e Velde, E. D. (1996) A Reliable Method to Determine Friction Capacity of Piles Driven into Clays. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 28., 1996, Houston. Proceedings. Richardson: Society of Petroleum Engineers, p. 337-346.
- Lehane, B. M.; Li, Y. e Williams, R. (2013) Shaft Capacity of Displacement Piles in Clay Using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Raleigh, v. 139, n. 2, p. 253-266.
- Lehane, B. M.; Schneider, J. A. e Xu, X. (2005) The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRONTIERS IN OFFSHORE GEOTECHNICS, 1., 2005, Perth. Proceedings. London: Taylor & Francis Group, p. 683-688.
- Mayne, P. W. (2007) *NCHRP Synthesis 368 Cone Penetration Test*. Washington: TRB.
- Schnaid, F. (2000) *Ensaios de Campos: e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. Nova Iorque: John Wiley & Sons.
- Viggiani, C.; Mandolini, A. e Russo, G. *Piles and Pile Foundations*. Nova Iorque: Spon Press, 2012.