XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/50

Desempenho de Modelos Computacionais e Abordagens Semiempíricas na Estimativa de Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua

Vitor Gabriel Silva Santos
Estudante, UNICAMP, Campinas, Brasil, v240721@dac.unicamp.br

Gentil Miranda Júnior
Diretor Técnico, GEBASE, Campinas, Brasil, gentil@gebase.com.br

Paulo José Rocha de Albuquerque
Professor, UNICAMP, Campinas, pjra@unicamp.br

Fernando Feitosa Monteiro
Professor, UNICAMP, Campinas, feitosam@unicamp.br

RESUMO: O presente estudo apresenta uma análise de comparação entre resultados de prova de carga e simulações orientadas utilizando o software RSPile para estaca H.C.M. situada na região de Campinas-SP e de métodos semiempíricos na previsão da capacidade de carga de tal fundação sob condições da estratigrafia local. Utilizando-se do RSPile foi desenvolvida uma modelagem de dimensão finita e orientada considerando o solo local. A estaca com 0,90 m de diâmetro e 17,5 m de comprimento, foi executada em local com 5 horizontes de solo entre camadas de argila siltoarenosa, silte arenoso e silte argiloarenoso. O estudo fez uma comparação dos resultados das simulações computacionais, previsões de metodologias semi-empíricas e resultados de prova de carga. Os resultados foram consistentes e convergentes perante os métodos, destacando eficácia do RSPile na modelagem do comportamento das estacas H.C.M. sobre a estratigrafia local, possibilitando que o estudo de otimização sobre projeto de fundações em auxílio de software juntamente com a base de provas de carga realizadas podem garantir eficiência projetiva, segurança e economia.

PALAVRAS-CHAVE: RSPile, Capacidade de carga, Hélice contínua.

ABSTRACT: This study presents a comparative analysis between static load test results, oriented simulations using the RSPile software for a C.F.A. pile located in the region of Campinas-SP, and semi-empirical methods for predicting the bearing capacity of such foundations under local stratigraphic conditions. Utilizing RSPile, a finite-dimensioned, oriented modeling was developed considering the soil profile. The Pile, with a diameter of 0,90 m and length of 17.5 m, was installed in a site featuring five soil horizons, including layers of sandy silty clay, sandy silt, and clayey sandy silt. The study compared the results of computational simulations, predictions from semi-empirical methodologies, and load test data. The results were consistent and converged across the different methods, highlighting the effectiveness of RSPile in modeling the behavior of CFA piles within the local stratigraphy. This demonstrates that optimization studies for foundation design, supported by software and a database of load tests, can ensure design efficiency, safety, and cost-effectiveness.

KEYWORDS: RSPile, Pile bearing capacity, Continuos flight auger pile

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de provas de carga estática (P.C.E.) é fundamental para a determinação da capacidade de carga permitindo, conforme denota Corrêa et. al. (202), a otimização de projetos de fundações por meio de economia de materiais e do ajuste geométrico de elementos estruturais. Segundo Albuquerque e Garcia (2022), o procedimento consiste no carregamento controlado de estacas - sejam de teste ou integralmente da obra -, com monitoramento sistemático de recalque em estágios definidos para validar a resistência real.

Nesse cenário, Alledi et. al (2015) ressaltam que métodos semiempíricos tradicionais, como os de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), frequentemente subestimam a parcela da resistência lateral, o que torna a validação experimental e as simulações computacionais de extrema importância para um refinamento preditivo. Diante de tal necessidade de precisão, o emprego de ferramentas de modelagem numérica, surgem como alternativas robustas para complementaridade à análise geotécnica convencional.

Dessa forma, a modelagem via software RSPile capacita uma poderosa análise estatística ao integrar parâmetros físicos e diretrizes projetivas em ambiente computacional, capaz de simular desde o comportamento individual de elementos, até recalques diferenciais em grupos de estacas. O software atua como um elo entre o ensaio de campo e a economia de execução, provendo dados quantitativos que conferem segurança e eficiência ao design de fundações. Sob tal ótica, o presente artigo investiga a correlação da capacidade de carga última de uma estaca hélice contínua, executada no município de Campinas-SP, confrontando os resultados obtidos por métodos semiepíricos e a modelagem numérica feita no RSPile, frente aos dados reais obtidos por meio de prova de carga estática.

2 METODOLOGIA

O estudo a seguir trata-se de uma obra realizada no município de Campinas sobre o campo de trabalho de um edifício com um modelo construtivo constituído por 3 subsolos, térreo e 24 pavimentos tipo com altura aproximada de 75,0 m de altura. Em vigor de projeto, com o estudo da estratigrafia local, da composição do projeto estrutural com cargas de magnitude elevada nos pilares, da ocorrência de lençol freático a uma profundidade média de 1,0 m além das condições locais de vizinhança contendo edificações de grande porte próximas a obra, foram adotadas fundações em estacas hélice contínua monitorada.

A composição do subsolo na região do edifício, apresenta características comuns a formação Serra Geral em Campinas, caracterizando a região sobre análises geológicas comuns conforme mostra Albuquerque (1996). A estratigrafia demonstrada nos relatórios de sondagem, por sua vez, seguem com uma camada inicial de composta por argila siltoarenosa e silte arenoso com espessuras entre 3,0 e 8,0 m e valores de Nspt entre 15 e 30 golpes, sobreposta por uma camadas de silte argiloarenoso e silte arenoso com espessuras entre 15,0 a 21,0 m de e valores de Nspt de 30 a 40/15 golpes, dessa forma demonstrando um total de 5 (cinco) horizontes distintos conforme as descrições feitas a posteriori.. A figura “X” demonstra a caracterização geológica média na região de Campinas e a figura “X” mostra o perfil médio do solo na região da torre descrita anteriormente.

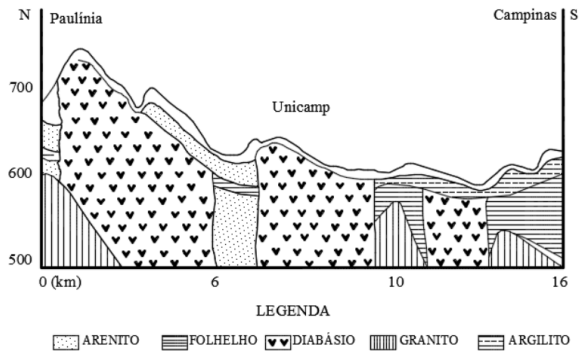


Figura 1. Perfil geológico da região de Campinas (Fonte: Albuquerque, 1996).

L (m)	Nspt	Tipo do solo	
			Cota da sondagem (753,19)
1	-	-	Cota do 2º Subsolo (752,01)
2	10	Argila siltoarenosa	
3	9	Silte arenoso	
4	16	Silte argiloarenoso	Cota do 3º Subsolo (748,95)
5	24		
6	27		
7	33		
8	35		
9	37		
10	15	Silte arenoso	
11	17		
12	21		
13	25	Silte argiloarenoso	
14	36		
15	38		
16	40		
17	46		
18	37/15		Cota da ponta (734,51)
19	40/15		
20	45/15		
21	46/15		

ESTACA TESTE ET.1 E ET.2

Figura 2. Estratigrafia do solo (Fonte: Lima et. al, 2020).

A organização dos dados da base experimental descritos anteriormente, foi realizada de modo a inseri-los no princípio da modelagem computacional feita no software RSPile mostrada na figura e permitir a utilização das equações de métodos semiempíricos para cálculo de capacidade de carga última. Com base no perfil de solo mostrado na figura "x", foi adotada para análise uma estaca hélice contínua de 90 cm de diâmetro e 17,5 m de comprimento utilizada nos estudos de otimização de projeto de fundações realizados por Lima et.al (2020). Unindo todas as informações pertinentes, empregou-se os métodos semiempíricos para cálculo de capacidade de carga propostos por Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996) a partir de dados de ensaio SPT.

Perante o software RSPile, em virtude da comparação dos resultados exibidos na modelagem com os métodos semiempíricos de capacidade de carga, utilizou-se os dados de prova de carga especificados por Lima et.al (2020) durante a base experimental realizada em obra para estudo de otimização do projeto de fundações. Toda a instrumentação e seguimento de ensaio de prova de carga realizado por Lima et.al (2020) foram baseados nas diretrizes da ABNT (2006). Lima et.al (2020), descreve que a estaca teste foi executada no nível do 2° subsolo do edifício de modo a se beneficiar da configuração de terraplenagem no terreno gerando menores volumes de corte.

Lima et.al (2020) denota que o solo ao redor da estaca teste foi escavado até uma profundidade de 3,0 m e a instrumentação da estaca se deu em 4 níveis de profundidade ao longo do fuste da estaca, com o primeiro nível de instrumentação em 0,50 m abaixo da face inferior do bloco de coroamento destacado com a atuação de seção de referência, o segundo nível a 3,0 m de profundidade no fuste para verificação do atrito lateral e ao qual correspondeu a posteriori da fase de ensaio o nível de arrasamento da estaca, o terceiro nível a 10,5 m de profundidade ao longo do fuste e o quarto nível em 16,95 m em proximidade a ponta da estaca. O autor descreve ainda que cada nível de instrumentação recebeu dois sensores em posição no eixo central da estaca de ensaio, sensores estes constituídos em barra de aço CA-50 com extensômetros elétricos (*strain gages*) conectados em ponte completa e protegidos mecanicamente com o isolamento elétrico de todo o circuito. A seguir, estão a figura "x" e a figura "x" adaptadas de Lima et.al (2020) demonstrando a base do ensaio realizado na estaca descrita.

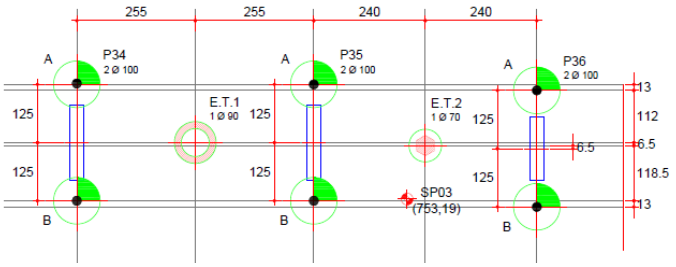


Figura 3. Planta com locação das provas de cargas (Fonte: Lima et. al, 2020).

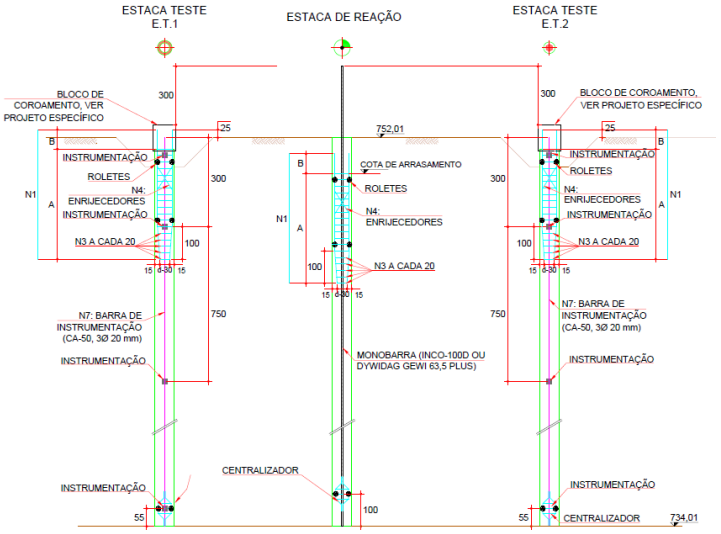


Figura 4. Detalhe da armação e níveis de instrumentação das estacas (Fonte: Lima et. al, 2020).

Em virtude do Software RSPile, foi realizada uma simulação numérica a partir da aplicação dos dados obtidos em campo a partir de utilização simplificada do software para a estaca estudada. Para a análise foi seguido o procedimento da categoria "Bored Pile" disponibilizada no software, possibilitando a utilização de propriedades Nspt do solo denotadas anteriormente na figura "x".

Na aplicação da simulação, os cinco horizontes de solo demonstrados na estratigrafia, foram analisados na categoria "Cohesionless", ou seja, desprezando o caráter coesivo de todas as camadas, mesmo em virtude destes serem constituídos por camadas de argila e camadas de silte. Para o cálculo da capacidade de carga em cada uma das camadas, adotou-se o método fornecido pelo software descrito como "SPT-AASHTO Method" por sua vez denotado pela fórmula de Reese and Wright (1977/1979) esboçado pelas equações 1, 2, 3 e 4. Logo, através dessa configuração, manteve-se esse padrão até o fim da simulação no RSPile.

$$Rl = 2,87\ x\ Nspt \quad \text{para Nspt} \leq 53 \quad (1)$$

$$Rl = 2,11\ x\ (Nspt - 53) + 148,7 \quad \text{para Nspt} > 53 \quad (2)$$

$$Rp = 57,54\ x\ Nspt \quad \text{para Nspt} \leq 75 \quad (3)$$

$$Rrup = Rl + Rp \quad (4)$$

De modo que:
Rl = Resistência Lateral em kN
Rp = Resistência de ponta em kN
Rrup = Resistência de Ruptura (capacidade de carga última) em kN
Nspt = Número de Golpes por camada

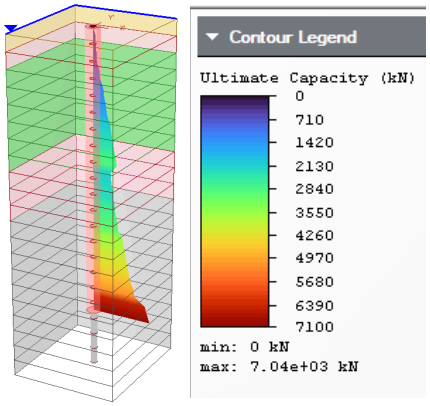


Figura 5. Estaca modelada no RSPile e sua respectiva legenda de capacidade de carga última.

3 RESULTADOS

Por meio da aplicação das informações no software, foram obtidos resultados através de simulação numérica, além dos resultados obtidos por meio da aplicação dos métodos semiempíricos. Todos estes foram comparados com os dados da prova de carga estática de referência no presente estudo. A tabela 1 apresentada a seguir, mostra os valores de resistência lateral (R_L), resistência de ponta (R_P) e capacidade de carga última (Rrup) para cada uma das metodologias descritas anteriormente além da prova de carga estática. A figura "x", demonstra graficamente o resultado obtido no RSPile.

Tabela 1. Valores de resistências obtidos para cada metodologia de cálculo de capacidade de carga.

Classe de solo	RL (kN)	RP (kN)	Rrup (kN)
P.C.E.	5411	1389	6800
Aoki-Velloso	3090	6123	9213
Teixeira	5463	2799	8262
Décourt-Quaresma	5245	1883	7128
RSPile	4293	2745	7038

Para a prova de carga estática, denota-se durante sua execução uma capacidade de carga última de aproximadamente 6800 kN, cuja a maior magnitude de carga provém da resistência lateral sendo de 5426 kN e a resistência de ponta de 1374 kN correspondendo a aproximadamente 20% da resistência total. Para a avaliação de precisão dos métodos semiempíricos, a prova de carga estática foi utilizada como referência, devido às diretrizes de execução e aferição do ensaio normatizadas.

Visando os resultados da simulação numérica, temos um valor de 7038 kN para a carga última, composta por 4293 kN referente à resistência lateral e 2745 kN referente a resistência de ponta compondo 79% e 51% comparadas as resistências lateral e de ponta obtidas na P.C.E respectivamente. Dessa forma, tais valores indicam que a simulação numérica garantiu, dentre os testes feitos, um resultado de parametrização comportamental da estaca contundente comparada a prova de carga estática realizada principalmente em relação a resistência lateral.

Em contraste com os resultados obtidos na prova de carga, temos que o método semiempírico de Aoki-Velloso, demonstrou um valor de 3090 kN para a resistência lateral (57% do valor denotado à P.C.E.), um valor de 6123 kN para a resistência de ponta (441% do valor denotado à PCE), de modo a gerar um valor de resistência final de 9123 kN a prova de carga (134% do valor denotado à PCE).

Já para o método de Décourt-Quaresma, em comparação a prova de carga, temos que este demonstrou um valor de 5245 kN para a resistência lateral (97% do valor denotado à PCE), um valor de 1883 kN para a resistência de ponta (136% do valor denotado à PCE), de modo a gerar um valor de resistência final de 7128 kN a prova de carga (105% do valor denotado à PCE).

Olhando para o método de Teixeira, em comparação a prova de carga, temos que este demonstrou um valor de 5463 kN para a resistência lateral (101% do valor denotado à PCE), um valor superior/inferior de 2799 kN para a resistência de ponta (202% do valor denotado à PCE), de modo a gerar um valor de resistência final de 8262 kN a prova de carga (122% do valor denotado à PCE).

Perante a consolidação dos dados na tabela 1 e denotados acima, observa-se que alguns métodos apresentam uma proximidade perante os resultados obtidos pela P.C.E. seja em seu valor final ou nas parcelas que o compõem, enquanto outros se mostraram caráter mais conservador ou mesmo superestimaram as parcelas de resistência lateral e de ponta, bem como a capacidade de carga última da fundação.

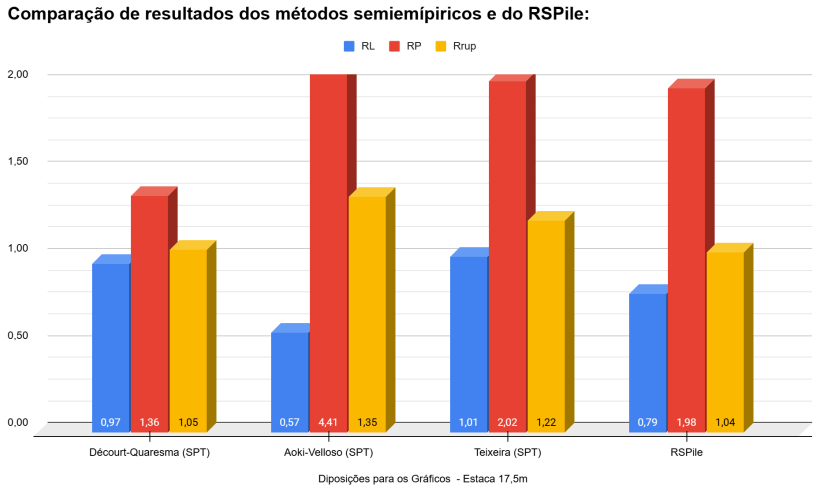


Figura 6. Razão das resistências estimadas e medidas na pesquisa.

A figura 6 oferece uma interpretação das razões de comparação entre as metodologias definidas anteriormente e a P.C.E. fornecendo a acurácia de cada método em relação ao valor obtido experimentalmente pela P.C.E adotando seus respectivos valores como valor de referência (razão igual a 1,0). Dessa forma, valores acima de 1 indicam superestimação, enquanto valores abaixo de 1 representam subestimação da resistência. Observando os resultados perante os métodos empíricos aplicados baseados no ensaio SPT superestimaram a resistência total da estaca (Rrup > 1,0), com destaque para o método de Aoki-Velloso (SPT), cuja razão para Rrup foi a maior entre os métodos avaliados (aproximadamente 4,41) demonstrando um comportamento arrojado perante a formulação original do método.

Já simulação com o software RSPile, houve uma maior proximidade ou até superestimação em relação aos valores medidos. A simulação, apresentou um valor de Rrup superior a 1,04, indicando superestimação da capacidade total da estaca, com contribuição significativa da resistência de ponta (RP ≈ 1,36). Verifica-se nesta simulação, que os parâmetros de resistência do solo, via metodologia empregada pelo software, foram em sua proporcionalidade calibrados contundente mediante a linha de cálculo adotada.

Logo, avalia-se portanto que dos métodos semiempíricos analisados, apresentam a uma variação do comportamento, hora mostrando-se conservador, hora arrojado. As análises computacionais, por sua vez, com a devida calibração, podem fornecer previsões satisfatórias dos valores reais, levando em conta a boa representação do modelo estratigráfico do solo mediante as suas propriedades.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo abarcou os resultados extraídos de ensaios de prova de carga estática rápida em estaca hélice contínua monitorada, cuja execução foi realizada no município de Campinas, São Paulo. Para o programa experimental, mediante a prova de carga realizada, a estaca recebeu uma carga axial de compressão possibilitando a elaboração de curvas carga versus deslocamento que juntamente com as formulações semiempíricas de capacidade de carga fundamentadas nos dados de SPT permitiram uma análise comparativa ao modelo computacional reproduzido no software RSPile. Tal análise verificou as metodologias abordadas bem como a fundamentação dos dados obtidos em campo e parametrizados para

lançamento dentro de uma abordagem computacional, permitindo validações eficazes dentro das incertezas e restrições de cada metodologia.

Desse modo, esta pesquisa permitiu uma compreensão sobre o comportamento da estaca hélice contínua monitorada sob carregamento axial e a aplicabilidade dos métodos analisados. A partir dos resultados alcançados, foram obtidas as seguintes conclusões:

- A modelagem computacional com o software RSPile demonstrou elevado potencial satisfatório perante as condições de estratigráficas do solo, permitindo mínimas condições de contorno realistas. Dessa forma a abordagem da simulação realizada no RSPile foi a que demonstrou resultados mais próximos àqueles obtidos na prova de carga estática;
- Os métodos semiempíricos baseados nos ensaios SPT apresentaram uma variação perante bases conservadora e arrojada de acordo com cada método e com a especificação da composição da resistência final perante à prova de carga. O método de Aoki e Velloso (SPT) apresentou a maior razão entre valores estimados e medidos, enquanto o método de Décourt e Quaresma (SPT) demonstrou desempenho relativamente melhor entre os métodos semiempíricos;
- Analisando a razão entre os valores estimados e medidos, constatou-se a validação de uma boa calibração perante os parâmetros de entrada na modelagem computacional destacando a necessidade da inserção minuciosa de cada um dos valores, algo que se destaca como divisor para uma boa modelagem.

Em validade à pesquisa realizada, cabe frisar que as inferências conclusivas obtidas nesta pesquisa possuem aplicabilidade restrita ao cenário analisado, denotando imprescindivelmente a avaliação criteriosa de particularidades de cada abordagem geotécnica de forma individual e pontual conforme os objetos analisados. Não obstante, os dados e conclusões apresentados oferecem contribuições significativas na compreensão do comportamento e desempenho de estacas hélice contínua monitorada, moldando um alicerce firme para desenvolvimento de futuros modelos preditivos de pesquisas voltadas à previsão da capacidade de carga.

AGRADECIMENTOS

Ressalta-se o agradecimento à empresa Rocscience Inc. pela concessão da licença acadêmica que viabilizou as análises computacionais deste estudo. Agradecimentos especiais ao diretor da América Latina, Sr. Raul Demarini, pelo apoio institucional, e ao executivo Sr. Alexandre Ferreira, da L.spot, representante oficial da Rocscience no Brasil, pelo suporte técnico e pela diligente mediação no acesso às ferramentas da plataforma. A colaboração das tais instituições foi essencial para a boa condução das simulações aqui apresentadas. Agradece-se também a disponibilização de dados e direcionamento de pesquisa por parte da equipe da Gebase - Projetos e Consultoria Geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, P. J. R.: "*Estacas Escavadas, Hélice Contínua e Ômega: Estudo do Comportamento à Compressão em Solo Residual de Diabásio, Através de Provas de Carga Instrumentadas em Profundidade*". Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2001).

Albuquerque, P. J. R., Garcia, J. R.: *Engenharia de fundações.* 1st edn. LTC, Rio de Janeiro (2022).

Aoki, N. & Velloso, D. A. *Um método aproximado para estimativa da capacidade de carga de estacas*. In: Panamerican Conference On Soils Mechanics And Foundation Engineering, 5 o , 1975, Buenos Aires, Proceedings...,Buenos Aires, 1975. v.1, p.367-376.

Barbosa, A. I. M., Albertini, M. M.: A*nálise Comparativa de Estimativa de Capacidade de Cargas de Estacas Profundas – métodos aoki-velloso e décourt-quaresma* (2022).

Borjaille Alledi, C. T. D., Minette, E., Albuquerque, P. J. R., & Polido, U. F.: "*Estaca hélice contínua instrumentada: previsão de carga de ruptura por métodos semiempíricos vs. prova de carga.*" Revista Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia (2015).

Caputo, H.: "*Mecânica dos Solos*." 8th edn. Capítulo 13: Estacas, estaca hélice contínua monitorada. LTC, Rio de Janeiro (2022).

Décourt, L. & Quaresma, A. R. *Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 6th, 1978, Rio de Janeiro. Anais..., Rio de Janeiro, 1978. v.1, p.45-53.

Figueiredo, C. M. M., Silva, M. P. S., & Frota, C.: "*Estudo de caso: edificação com fundações em estacas hélice contínua monitorada.*" Estudos Tecnológicos em Engenharia, vol. 11, n.º 1, pp. 29-38 (2015).

de Lima, H.S.M; Corrêa, B.I; Júnior, M.G; de Melo O.E; Rodriguez, G. T; *Otimização da Solução de Fundações em estacas hélice contínua através de provas de carga estatísticas de projeto instrumentadas.* XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (2020).

Monteiro, T. ., Araújo, C. B. C., Aguiar, M. F. P.: *Análise de métodos semi-empíricos nacionais e internacionais para determinação da capacidade de carga axial em estacas tipo raiz* (2018).

Paschoalin Filho, J. A.: "*Estudo do comportamento à tração axial de diferentes tipos de estacas em solo de diabásio da região de Campinas/SP*." Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas (2008).

Rocscience Inc. "*RSPile – Helical Pile Capacity Theory Manual*". Rocscience (2024).

Rocscience Inc. "*RSPile – Axially Loaded Piles Theory Manual*". Rocscience (2022).

Sant'ana, P. H. L.: *Execução de fundações utilizando a estaca hélice contínua monitorada: Estudo de caso em empreendimento habitacional* (2023).

Schmertmann, J. H.: "*Guidelines for Cone Penetration Test (Performance and Design)*". Federal Highway Administration (FHWA), Gainesville, Florida (1978).

Teixeira, A. H. *Projeto e execução de fundações*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3., 1996, São Paulo. Anais…São Paulo, 1996, v. 1. p. 33-50.

Wright S. J., Reese L.C. (1979) - *Design of large diameter bored piles*. Ground Engineering, Vol. 12.