

Proposta de previsão da capacidade de carga à tração de estacas tipo hélice contínua em solos granulares

Caio Cardoso Scipião ^[1], Alfran Sampaio Moura ^[2]

[1] caioscipiao@live.com. [2]alfransampaio@ufc.br. Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

RESUMO

Projetos de fundações devem apresentar segurança quanto à ruptura do elemento estrutural e do sistema solo-estrutura, além de deformações aceitáveis. Em edifícios é comum fundações solicitadas apenas por cargas à compressão, entretanto, em diversas obras as fundações podem ser submetidas à tração. Neste caso é necessário verificar também se há segurança adequada com relação a ruptura devida à tração. Nesse contexto, o presente artigo avalia a aplicabilidade de métodos específicos e não específicos para estimar a capacidade de carga à tração de estacas tipo hélice contínua em solos granulares. Além disso, foi desenvolvida uma metodologia para estimar a carga última à tração do mencionado tipo de estaca. Para isso, foram utilizadas 97 sondagens à percussão (SPT) e 12 estacas tracionadas do tipo hélice contínua, todas assentes em perfil de solo granular. Entre os métodos utilizados, o método específico mais concordante foi o de Meyerhof e Adams (1968), e o método não específico mais concordante foi o de Meyerhof (1953), ambos com estimativas em média 65% superiores aos valores de referência e com elevada dispersão. Já o método desenvolvido apresentou concordância e dispersão inferiores, revelando-se uma alternativa para a determinação da capacidade de carga à tração de estacas tipo hélice contínua em solos granulares.

Palavras-chave: Fundações. Estacas tipo hélice contínua. Capacidade de carga à tração. Prova de carga estática.

ABSTRACT

Foundations projects must present security measures concerning the structural element and soil-structure system failure and acceptable displacements. In buildings it is very common to have foundations which are only subjected to compressive loads, however, in many of them, the foundations are submitted to uplifting forces, thus it is also necessary to verify the safety conditions regarding uplift capacity. In this context, this article evaluates the applicability of specific and non-specific methods for estimating the uplift bearing capacity of continuous flight auger piles in granular soils. In addition to that, a method was developed in order to estimate the ultimate uplift capacity of these pile types. In order to so, this research was based on 97 Standard Penetration Tests (SPT), and 12 continuous flight auger piles in granular soils subjected to the uplift forces. Among the evaluated literature methods, the specific method that presented the best agreement was Meyerhof and Adams (1968), and the non-specific one was Meyerhof (1953), both with approximately 65% higher values, in average, than the reference values and with great scatter. On the other hand, the developed method presented good agreement and lower scatter, establishing an alternative for the determination of uplift bearing capacity of continuous flight auger piles in granular soils.

Keywords: Foundations. Continuous flight auger piles. Uplift bearing capacity. Load test.

1 Introdução

Em edifícios convencionais, é comum fundações solicitadas apenas por cargas à compressão. No entanto, há diversas obras nas quais as fundações podem ser submetidas a outros tipos de esforços, como flexão e tração, além de esforços cíclicos, que frequentemente ocorrem em fundações de aerogeradores, linhas de transmissão de energia, pontes e ancoragens de lajes de subpressão. Nesse contexto, a previsão da capacidade de carga à tração utilizando processos de fácil utilização é de grande interesse.

Para estimar a capacidade de carga à tração de estacas, podem-se utilizar métodos desenvolvidos especificamente para isso, ou admitir que a carga última à tração seja uma fração da resistência lateral à compressão. Neste caso, em se tratando de mecanismos diferentes, habitualmente considera-se um percentual de 70% da parcela lateral da capacidade de carga à compressão da estaca.

Diante do exposto, o presente artigo apresenta uma avaliação da utilização de métodos específicos e não específicos para a estimativa da carga última à tração de estacas tipo hélice contínua em perfil de solo granular. Além disso, é apresentada e avaliada uma proposta alternativa para a previsão da capacidade última à tração.

2 Capacidade de carga à tração em estacas

A literatura disponibiliza alguns métodos específicos para a determinação da capacidade de carga à tração de estacas. Um dos métodos pioneiros sobre o tema foi o de Balla (1961), dando início ao desenvolvimento de outros métodos como os de Meyerhof e Adams (1968), Meyerhof (1973), Kulhawy (1985), Levacher e Sieffert (1984), Das (1983) e o método desenvolvido na Universidade de Grenoble.

Apesar de existirem esses métodos próprios para estimar a capacidade de carga à tração, na prática, o mais usual é admitir que a carga última à tração seja calculada por meio de métodos para estimar a capacidade de carga à compressão, admitindo-se que a resistência lateral à tração seja cerca de 70% a 100% da resistência lateral à compressão, desprezando-se, assim, a parcela de resistência de ponta da estaca.

Algumas pesquisas relevantes, mais recentes e relacionadas ao tema deste trabalho, podem ser obtidas em Santos (1999), Orlando (1999), Eil (2003),

Bessa (2005), Paschoalin Filho (2008), Forato (2015), Hirai, Wakai e Aoki (2016), Honda, Hirai e Sato (2011) e Shanker, Basudhar e Patra (2006).

3 Metodologia, locais de estudo e dados coletados

Inicialmente foram definidos os locais do estudo, coletados os dados necessários e determinados os valores das capacidades de carga das estacas analisadas a partir dos resultados de provas de carga estática (PCE) à tração. Em seguida, foram estimadas as capacidades de carga à tração dessas mesmas estacas por meio de diversos métodos específicos e não específicos disponíveis na literatura. Posteriormente foram realizadas comparações entre as estimativas efetuadas e os valores obtidos nas provas de carga. Além disso, foi desenvolvida uma proposta para previsão da carga de ruptura à tração de estacas tipo hélice contínua em solo granular. Por último, foram apresentadas as conclusões do estudo.

No presente estudo, foram utilizadas informações de três obras. A primeira obra (nº 1) está localizada em Igarorã – BA, a segunda (nº 2), em Paracuru – CE e a terceira obra (nº 3), em Fortaleza – CE. Os dados utilizados dessas obras são resultados de provas de carga estática à tração, de monitoramentos de estacas de reação em ensaios de provas de carga à compressão e resultados de sondagens à percussão (SPT), conforme consta na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação de dados utilizados

Dados utilizados	Obras			Total
	1	2	3	
Prova de carga à tração	1	-	-	1
Monitoramento das reações da PCE à compressão	-	4	7	11
Sondagens à percussão (SPT)	7	30	60	97

Fonte: Dados da pesquisa

Na obra 1, foi realizado um ensaio de prova de carga à tração com carregamento lento em uma estaca de 14,31 m de comprimento e diâmetro de 600 mm. Já na obra 2, foi executado um ensaio de prova de carga à compressão do tipo lento em que foram monitoradas quatro estacas de reação. O monitoramento consistiu em medir deslocamentos verticais de arrancamento por meio de extensômetros

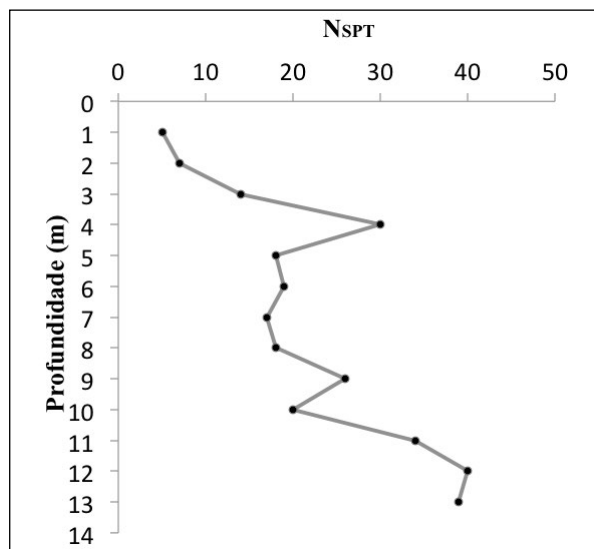
e, em paralelo, os acréscimos de carga à compressão da estaca comprimida. O diâmetro das mencionadas estacas era de 700 mm. Já os comprimentos dessas estacas variavam entre 9,12 m e 9,68 m. Por fim, na obra 3, foram utilizados resultados de monitoramentos de seis estacas de reação em uma prova de carga à compressão com 23 m de comprimento e 600 mm de diâmetro. Já em uma segunda prova de carga realizada nesta mesma obra, foram monitoradas outras duas estacas de 22 m de comprimento e 500 mm de diâmetro.

Vale mencionar que todas as provas de carga estática foram executadas com carregamentos do tipo lento, de acordo com as recomendações da NBR 12131 (ABNT, 2006).

4 Caracterização geotécnica e provas de carga

Foram coletadas 97 sondagens à percussão (SPT); destas, foram selecionadas as sondagens mais próximas das provas de carga utilizadas e mencionadas na Tabela 1. O subsolo da obra 1 apresenta característica predominantemente granular e é composto, basicamente, de uma camada de silte arenoso na superfície e de uma camada de silte argiloso mais profundamente, a cerca de 8 m. O ensaio atingiu uma profundidade de 12,45 m e não alcançou o nível d'água (NA). A Figura 1 apresenta os resultados da sondagem à percussão da obra 1.

Figura 1 – Perfil de N_{SPT} do subsolo da obra 1

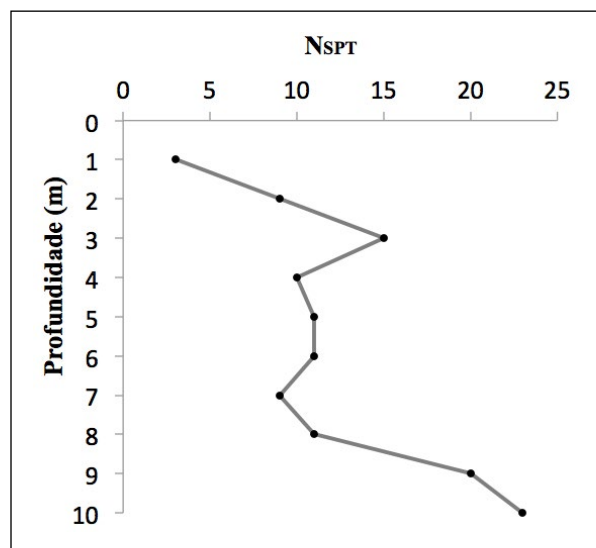


Fonte: Elaborada pelos autores

Como pode ser observado na Figura 1, nos quatro primeiros metros, o N_{SPT} cresce de 5 golpes para 30. A partir daí, o N_{SPT} varia de 17 a 26 golpes até 10 m de profundidade. Logo após, o N_{SPT} aumenta e ultrapassa 30 golpes.

Já o subsolo da obra 2 é homogêneo e composto de uma areia fina. A sondagem atingiu a profundidade de 9,52 m e o nível d'água foi identificado na profundidade de 1,14 m. Na Figura 2, mostram-se os resultados da sondagem à percussão da obra 2.

Figura 2 – Perfil de NSPT do subsolo da obra 2

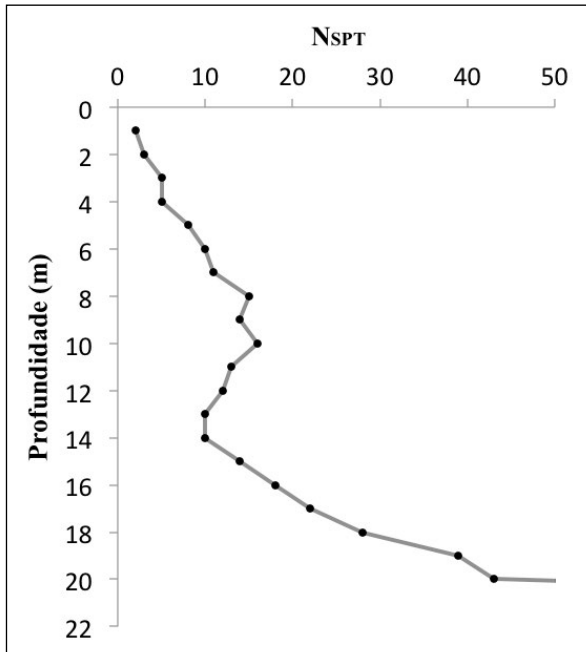


Fonte: Elaborada pelos autores

Na Figura 2, observa-se que o N_{SPT} varia de 3 a 15 golpes nos três primeiros metros. Posteriormente permanece com um valor constante de cerca de 10 golpes até o oitavo metro, e atinge 20 golpes nos 2 últimos metros.

Para representar o subsolo da obra 3, foi selecionada a sondagem ilustrada na Figura 3, em que se observa a presença de um solo predominantemente granular, contendo areia até a profundidade de 15,80 m, seguida de uma argila arenosa até a profundidade de 21,24 m. Neste caso, o nível d'água foi detectado na profundidade de 2 m.

Figura 3 – Perfil de NSPT do subsolo da obra 3

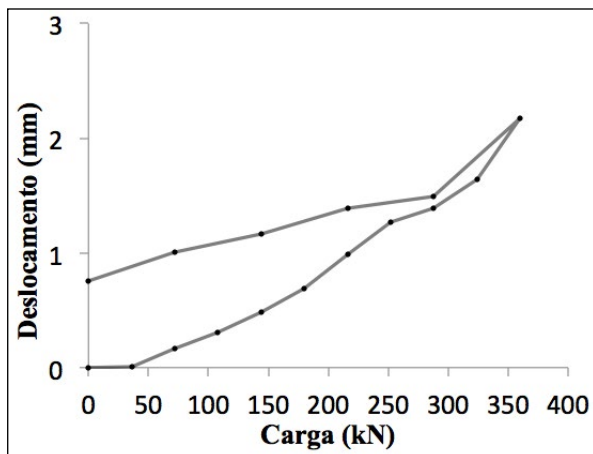


Fonte: Elaborada pelos autores

Pela Figura 3, observa-se um crescimento do N_{SPT} de 2 até 16 golpes na profundidade de 10 m. Posteriormente ocorre uma redução do N_{SPT} até 10 golpes no décimo quarto metro. Por fim, o N_{SPT} cresce até a profundidade de 21,24 m, superando 50 golpes.

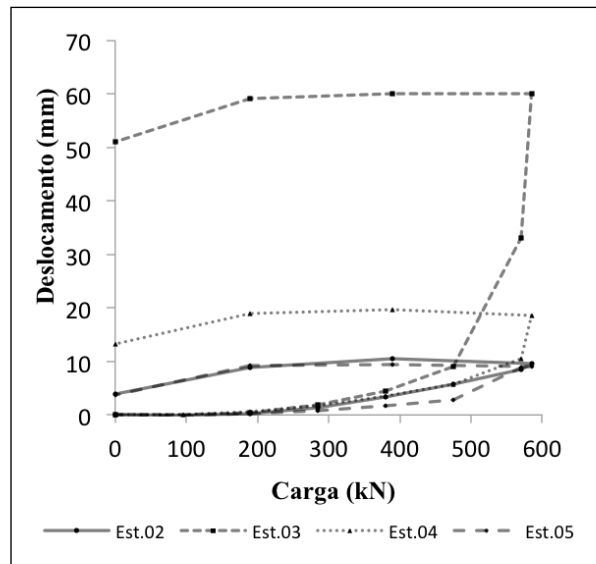
Com relação às provas de carga, foram geradas curvas “carga x deslocamento” dos ensaios realizados à tração em estacas das mencionadas obras (Figuras 4 a 7), conforme mencionado na Tabela 1.

Figura 4 – Curva carga x deslocamento da prova de carga à tração da estaca da obra 1



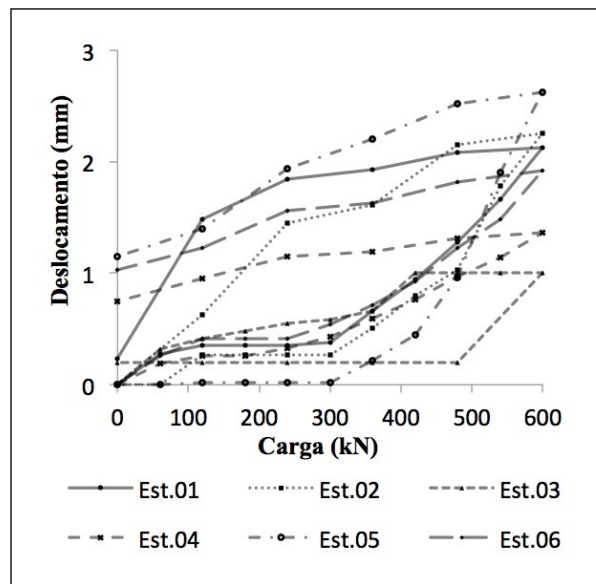
Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 5 – Curvas carga x deslocamento à tração das estacas de reação da obra 2



Fonte: Elaborada pelos autores

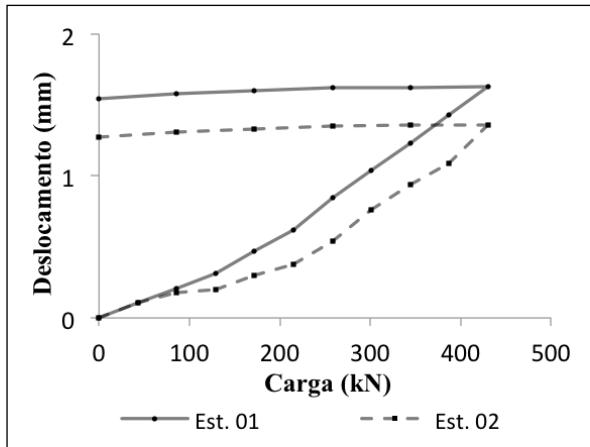
Figura 6 – Curvas carga x deslocamento à tração do ensaio nº 1 da obra 3



Fonte: Elaborada pelos autores

Nas Figuras 4 a 7, observam-se deslocamentos máximos de 3 mm. A exceção ocorreu somente nas estacas da obra 2, que atingiram deslocamentos de até 60 mm. Vale destacar que somente na estaca nº 3 da obra 2 foi observada ruptura nítida.

Figura 7 – Curvas carga x deslocamento à tração do ensaio nº 2 da obra 3



Fonte: Elaborada pelos autores

5 Previsões da carga de ruptura à tração e comparação dos resultados

Os valores das cargas de ruptura à tração das estacas foram determinados a partir dos resultados das provas de carga por meio do método de Van der Veen (1953). Um resumo dos valores obtidos está apresentado na Tabela 2.

Não foi possível obter a carga de ruptura da estaca 4 (primeiro ensaio, obra 3), em decorrência da elevada linearidade da relação carga x deslocamento, que resultou em estimativa da carga última à tração demasiadamente elevada.

Na sequência, foram estimadas as cargas últimas à tração por diversos métodos não específicos e específicos, entre esses o do Cone, Cilindro de atrito, Meyerhof e Adams (1968), Meyerhof (1973), Kulhawy (1985), o da Universidade de Grenoble, Levacher e Sieffert (1984) e Das (1983). Já os métodos não específicos utilizados foram os de Meyerhof (1953), Aoki e Velloso (1975) com adição de Monteiro (1997), Décourt e Quaresma (1978), Teixeira (1996) e Antunes e Cabral (1996). Vale mencionar que as estimativas dos parâmetros dos solos foram realizadas a partir de correlações consagradas com o N_{SPT} ; mais detalhes das correlações efetuadas podem ser obtidos em Scipião (2019). Os parâmetros utilizados, correlacionados com o N_{SPT} médio, estão apresentados em resumo na Tabela 3.

Tabela 2 – Resumo das cargas últimas à tração das estacas

Estaca	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Carga de ruptura (kN)
Obra 1: Igaporã – BA			
1	14,3	600	500
Obra 2: Paracuru – CE			
2	9,7	700	650
3	9,1	700	586
4	9,4	700	586
5	9,6	700	601
Obra 3: Fortaleza – CE			
2	1° Ens.	23	600
3		23	600
4		23	600
5		23	600
6		23	600
7		23	600
1		2° Ens.	22
2	22		500

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para as estimativas dos métodos

Estaca	Parâmetros				
	N_{SPT} médio	Φ (°)	γ_s (kN/m³)	K_0	K_a
Obra 1: Igaporã – BA					
1	30	39,5	18	0,36	0,22
Obra 2: Paracuru – CE					
2	12	30,5	20	0,49	0,33
3	11	29,8	20	0,50	0,34
4	11	29,8	20	0,50	0,34
5	12	30,5	20	0,49	0,33
Obra 3: Fortaleza – CE					
2	1° Ens.	22	36	21	0,41
3		22	36	21	0,41
4		22	36	21	0,41
5		22	36	21	0,41
6		22	36	21	0,41
7		22	36	21	0,41
1		2° Ens.	19	34,5	21
2	19		34,5	21	0,43

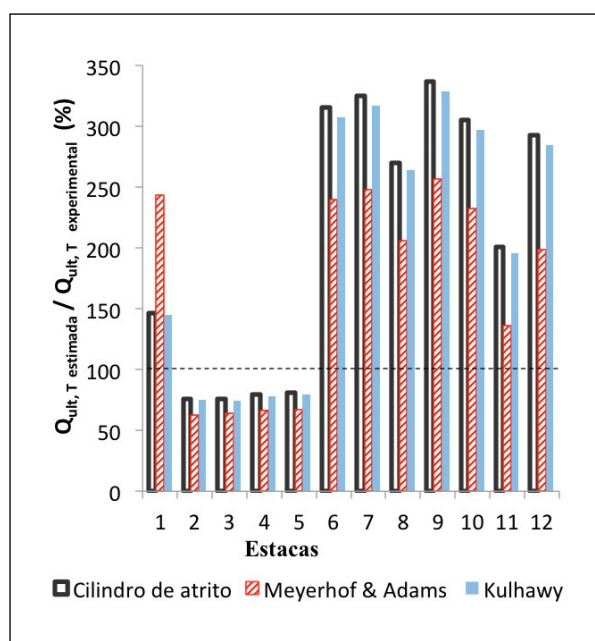
Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 8 mostra a comparação entre os valores estimados e os valores de referência determinados a

partir das provas de carga à tração. No gráfico da Figura 8 apresenta-se a relação percentual dos valores estimados em comparação aos valores de referência para as 12 estacas analisadas.

Os métodos específicos que proporcionaram as estimativas que mais se aproximaram dos valores de referência das provas de carga à tração foram os métodos do Cilindro de atrito, o de Meyerhof e Adams (1968) e o de Kulhawy (1985), por isso, são os mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Comparação entre as estimativas efetuadas por métodos específicos

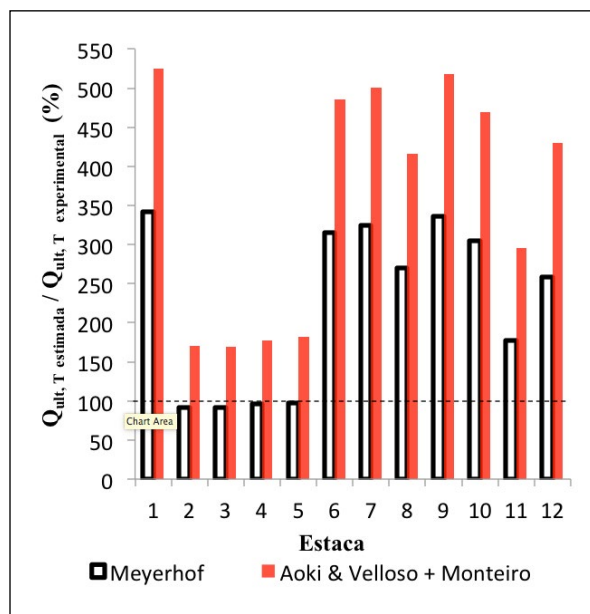


Fonte: Elaborada pelos autores

O método proposto por Meyerhof e Adams (1968) foi o que proporcionou resultados mais concordantes, com valores em média 68% superiores aos valores de referência, e também foi o que apresentou o menor desvio padrão. Os demais métodos não retratados na Figura 8 obtiveram estimativas muito divergentes em relação aos valores de referência.

Já quanto aos métodos não específicos, o de Meyerhof (1953) e o de Aoki e Velloso (1975) com as modificações de Monteiro (1997) foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos experimentalmente. Na Figura 9 são apresentadas as relações entre as cargas de ruptura previstas e as obtidas experimentalmente para as 12 estacas analisadas. Vale mencionar que os métodos não específicos foram utilizados desprezando a parcela referente à ponta da estaca.

Figura 9 – Comparação entre as estimativas efetuadas por métodos não específicos



Fonte: Elaborada pelos autores

Entre os métodos não específicos, o que apresentou resultados mais concordantes foi o de Meyerhof (1953). Em média, as estimativas efetuadas por esse método foram 125% superiores aos valores de referência, apresentando também o menor desvio padrão.

Comparando os resultados obtidos pelo método específico mais concordante – método de Meyerhof e Adams (1968) – e pelo método não específico mais concordante – método de Meyerhof (1953) –, observa-se que o método de Meyerhof e Adams (1968) foi mais concordante. Por outro lado, considerando-se a resistência lateral à tração como 70% da resistência lateral à compressão, obtém-se mais concordância pelo método de Meyerhof (1953), com valores em média 57% superiores aos obtidos nos ensaios.

6 Desenvolvimento de proposta e validação

A partir dos dados coletados, foi desenvolvido um método para determinar a carga última à tração em estacas tipo hélice contínua em solos granulares.

Considerando-se que a estaca resiste à tração em função da resistência por atrito lateral (R_l) entre o solo e a estaca e pelo peso próprio (W), temos que:

$$Q_{ult,T} = R_l + W \quad (1)$$

A resistência lateral unitária ($R_{l,u}$) à tração foi considerada igual à resistência na interface solo-estaca, atendendo ao critério de Mohr-Coulomb, de forma que:

$$R_{l,u} = \sigma_h \tan \delta + c_a \quad (2)$$

Onde σ_h é a tensão horizontal, δ é o ângulo de atrito e c_a é a coesão de aderência da interface solo-estaca, considerados, para fins práticos, iguais ao ângulo de atrito (ϕ) e à coesão (c) do solo, respectivamente. Em se tratando de solos granulares, a coesão é considerada nula. Já a tensão horizontal (σ_h) é dada pelo produto da tensão vertical (σ_v) pelo coeficiente de tensão horizontal ativo (K_a), visto que esta pesquisa considera apenas estacas tipo hélice contínua. Como a tensão vertical (σ_v) é dada pelo produto da profundidade (L) pelo peso específico do solo (γ_s), tem-se:

$$R_{l,u} = L \cdot \gamma_s \cdot K_a \cdot \tan \phi \quad (3)$$

Fundamentando-se na recomendação de Meyerhof (1973), a qual sugere que a resistência lateral cresce até uma profundidade crítica (L_{cr}), foi admitida uma elevação linear da resistência lateral até uma profundidade de 15 vezes o diâmetro, permanecendo constante a partir daí. Dessa forma, a equação 3 foi subdividida em duas parcelas: na primeira, a resistência lateral unitária cresce linearmente até o comprimento crítico, utilizando para os cálculos as médias dos parâmetros das seções, e na segunda, a resistência lateral unitária alcança o comprimento crítico, tornando-se constante. Por fim, foi necessária a multiplicação pela área lateral (A) de cada seção, resultando em:

$$R_l = \sum_0^{L_{cr}} \frac{L_{cr} \cdot \gamma_s}{2} \cdot K_a \cdot \tan \phi \cdot A + \sum_{L_{cr}}^L L_{cr} \gamma_s \cdot K_a \cdot \tan \phi \cdot A \quad (4)$$

Dessa forma, tem-se que:

$$R_l = \sum_0^{L_{cr}} \frac{L_{cr} \cdot \gamma_s}{2} \cdot K_a \cdot \tan \phi \cdot L_{cr} \cdot U + \sum_{L_{cr}}^L L_{cr} \cdot \gamma_s \cdot K_a \cdot \tan \phi \cdot (L - L_{cr}) \cdot U \quad (5)$$

Onde U é o perímetro da estaca. Organizando a equação 5, temos:

$$R_l = \sum_0^{L_{cr}} 0,5 \cdot L_{cr}^2 \cdot U \cdot \gamma_s \cdot K_a \cdot \tan \phi + \quad (6)$$

A equação 6 foi desenvolvida para solos granulares homogêneos, porém, quando há presença de nível d'água, algumas modificações são necessárias. Dessa forma, para estimar a carga última à tração em estacas tipo hélice contínua, foram desenvolvidas três equações: a equação 7 é adotada para casos de solos secos ou totalmente saturados; a equação 8 é para casos em que o nível d'água (N.A.) está entre o início da estaca e o comprimento crítico (L_{cr}), e a equação 9 é adotada quando o nível d'água (N.A.) encontra-se abaixo do comprimento crítico (L_{cr}).

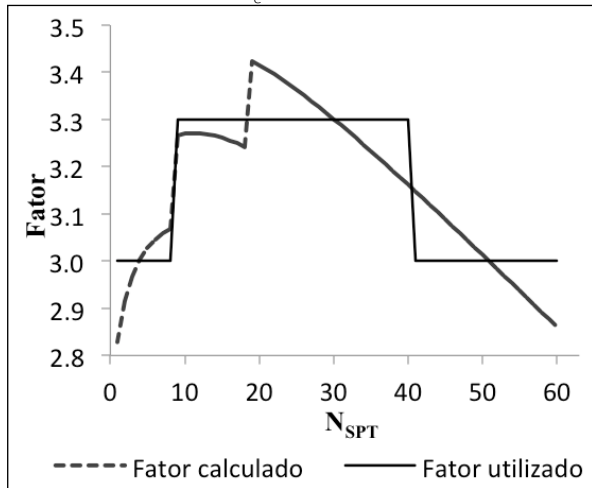
$$Q_{ult,T} = W + (0,5 \cdot L_{cr}^2 \cdot U \cdot F_C) + [L_{cr} \cdot (L - L_{cr}) \cdot U \cdot F_C] \quad (7)$$

$$Q_{ult,T} = W + (0,5 \cdot L_{NA}^2 \cdot U \cdot F_C) + [0,5 \cdot (L_{cr}^2 - L_{NA}^2) \cdot U \cdot F_C] + [L_{cr} \cdot (L - L_{cr}) \cdot U \cdot F_C] \quad (8)$$

$$Q_{ult,T} = W + (0,5 \cdot L_{cr}^2 \cdot U \cdot F_C) + [L_{cr} \cdot (L_{NA} - L_{cr}) \cdot U \cdot F_C] + [L_{cr} \cdot (L - L_{NA}) \cdot U \cdot F_C] \quad (9)$$

Buscando simplificar as equações, o produto do peso específico do solo (γ_s), da tangente do ângulo de atrito do solo (ϕ) e do coeficiente de empuxo ativo (K_a) foi denominado de F_C , obtido por correlação com o N_{SPT} , conforme mostra a Figura 10, na qual é possível observar que, em intervalos de N_{SPT} , o F_C apresenta valores uniformes. Desse modo, foram determinados valores a partir da média dos valores calculados em cada intervalo. A Figura 10 mostra a determinação dos intervalos dos fatores (F_C) em função do N_{SPT} para solos granulares secos.

Figura 10 – Fator (F_c) para solos granulares secos



Fonte: Elaborada pelos autores

O mesmo procedimento foi adotado para os casos com ocorrência em solos granulares saturados; nesses casos, foi adotado o peso específico do solo submerso, por se tratar de tensões efetivas. Por uma questão prática, serão apresentados neste artigo apenas os resultados das mencionadas análises; maiores detalhes dessa determinação podem ser encontrados em Scipião (2019). Dessa forma, o fator F_c é obtido na Tabela 4 em função do N_{SPT} médio do solo granular.

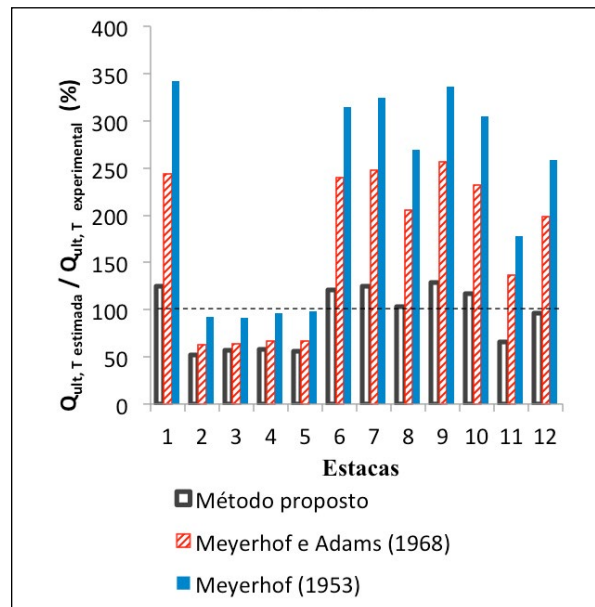
Tabela 4 – Fator F_c em função do N_{SPT}

N_{SPT}	Solo granular (kN/m ³)	
	Seco	Saturado
1 a 8	3	1,7
9 a 40	3,3	2
41 a 60	3	1,9

Fonte: Dados da pesquisa

Com a finalidade de avaliar a acurácia das equações propostas, estas foram utilizadas para estimar as cargas últimas à tração das 12 estacas analisadas. Vale mencionar que duas delas (estaca 4 da obra 2 e estaca 2 da obra 3) foram utilizadas exclusivamente na validação. A Figura 11 mostra uma comparação das estimativas das cargas últimas à tração a partir das equações propostas e pelos métodos de Meyerhof e Adams (1968) e de Meyerhof (1953), sendo estes últimos os métodos específico e não específico mais concordantes nesta pesquisa. No gráfico da Figura 11, os resultados das previsões estão apresentados em porcentagens dos valores de referência obtidos experimentalmente nas provas de carga à tração.

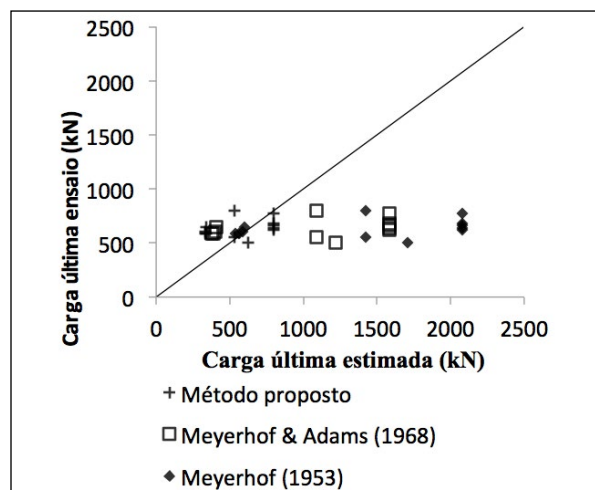
Figura 11 – Avaliação das previsões da carga última à tração a partir da equação proposta e utilizando os métodos específico e não específico mais concordantes



Fonte: Elaborada pelos autores

Como pode ser observado na Figura 11, o método proposto (equações 7 a 9) apresentou estimativas mais concordantes do que os demais métodos avaliados e disponíveis na literatura. Na Figura 12, pode-se observar que os pontos do gráfico mais próximos da reta de 45° coincidem justamente com os valores de carga última à tração obtidos por meio da equação proposta.

Figura 12 – Comparação entre a carga última à tração estimada e a experimental para as estacas 1 a 12



Fonte: Elaborada pelos autores

Na Figura 12, observa-se que o método proposto resultou em estimativas mais próximas da reta de 45°; além disso, apresentou a menor dispersão se comparado aos demais métodos utilizados.

Considerando apenas as duas estacas utilizadas exclusivamente na validação, na estaca 4 da obra 2, a previsão em relação ao valor experimental foi 42% inferior; já na estaca 2 da obra 3, a estimativa foi 21% superior. Considerando todas as 12 estacas em estudo, as estimativas variaram de 52% a 129% em relação aos valores de referência.

7 Conclusões

As estimativas dos métodos específicos de carga última à tração das estacas analisadas apresentaram resultados divergentes com relação aos valores de referência obtidos experimentalmente. Os métodos específicos que proporcionaram os resultados mais concordantes foram os métodos do Cilindro de atrito, o de Meyerhof e Adams (1968) e o de Kulhawy (1985). Entre estes, o mais concordante foi o método de Meyerhof e Adams (1968), com valores em média 68% superiores aos valores de referência, no entanto, com dispersão consideravelmente elevada.

Já as estimativas efetuadas por métodos desenvolvidos para estimar cargas laterais à compressão proporcionaram resultados ligeiramente mais concordantes – vale mencionar que, neste caso, considerou-se que a resistência lateral à tração corresponde a 70% da resistência lateral à compressão, conforme sugere a literatura (VELLOSO; LOPES, 2011; BOWLES, 1997; HACHICH *et al.*, 1998). Nesse caso, os métodos de Meyerhof (1953) e de Aoki e Velloso (1975) com adição de Monteiro (1997) foram os mais concordantes. O método de Meyerhof (1953) foi o mais concordante entre estes: possibilitou estimativas em média 64% superiores aos valores obtidos experimentalmente e também apresentou dispersão elevada.

Por fim, o método proposto é de fácil aplicação prática e proporcionou as estimativas mais concordantes para as estacas analisadas. A diferença entre as previsões com as equações propostas e os valores de referência foi 42% inferior para uma das estacas de validação e 21% superior para a outra. Considerando todas as 12 estacas analisadas, as estimativas variaram de 52% a 129% em relação aos valores experimentais, indicando a menor dispersão entre todos os métodos utilizados. Dessa forma, verifica-se que o método proposto é uma alternativa

viável para estimativas da carga de ruptura à tração de estacas tipo hélice contínua em solo granular.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, W. R.; CABRAL, D. A. Capacidade de carga de estacas hélice contínua. *In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA*, 3., 1996, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 1996. v. 2, p. 105-109.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. Um método aproximado para estimativa da capacidade de carga de estacas. *In: CONGRESSO PANAMERICANO DE DINÂMICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES*, 5., 1975, Buenos Aires. **Anais [...]**. Buenos Aires: Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, 1975. v. 5, p. 367-376.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12131**: Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- BALLA, A. The resistance of breaking out of mushroom foundations for pylons. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 5., 1961, Paris. **Proceedings [...]**. Paris: Dunod, 1961. v. 1, p. 569-576.
- BESSA, A. O. **Avaliação da resistência lateral em estacas escavadas com trado submetidas à tração**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- DAS, B. M. A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles. **Soils and Foundations**, v. 23, n. 3, p. 122-126, 1983.
- 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*, 6., 1978, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 1978. v. 1, p. 45-53.
- ELL, S. M. **Análise do comportamento à tração de estacas apiloadas executadas em solos arenosos do interior do estado de São Paulo**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FORATO, J. A. **Estudo do atrito lateral de estacas escavadas e sua correlação via investigação de campo na região de Viçosa/MG**. 2015.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

HACHICH, W. *et al.* (ed.). **Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 1998.

HIRAI, Y.; WAKAI, S.; AOKI, M. **In-situ pull-out test of cast-in-place concrete piles with belled enlargements**. Japanese Geotechnical Society Special Publication, v. 2, n. 41, p. 1478-1481, 2016.

HONDA, T.; HIRAI, Y.; SATO, E. Uplift capacity of belled and multi-belled piles in dense sand. **Soils and Foundations**, v. 51, n. 3, p. 483-496, 2011.

KULHAWY, F. H. Drained uplift capacity of drilled shafts. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., 1985, San Francisco. **Proceedings** [...]. San Francisco: CRC Press, 1985. v. 3, p. 1549-1552.

LEVACHER, D. R.; SIEFFERT, J. G. Tests on model tension piles. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 110, n. 12, p. 1735-1747, 1984.

MEYERHOF, G. G. The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1953, Switzerland. **Proceedings** [...]. Zurich: ICSMFE, 1953. v. 1, p. 440-445.

MEYERHOF, G. G. The uplift capacity of foundations under oblique loads. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 10, n. 1, p. 64-70, 1973.

MEYERHOF, G. G.; ADAMS, J. I. The ultimate uplift capacity of foundations. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 5, n. 4, p. 225-244, 1968.

MONTEIRO, P. F. **Capacidade de carga de estacas – método Aoki-Velloso**. Relatório interno de Estacas Franki Ltda., 1997.

ORLANDO, C. **Contribuição ao estudo da resistência de estacas tracionadas em solos arenosos: análise comparativa da resistência lateral na tração e na compressão**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PASCHOALIN FILHO, J. A. **Estudo do comportamento à tração axial de diferentes tipos de estacas**

em solo de diabásio da região de Campinas/SP. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SANTOS, A. P. R. **Capacidade de carga de fundações submetidas a esforços de tração em taludes**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SCIPIÃO, C. C. **Análise da previsão da capacidade de carga à tração de estacas hélice contínua em solo granular e proposta de alternativas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SHANKER, K.; BASUDHAR, P.; PATRA, N. R. Uplift capacity of pile groups embedded in sands: predictions and performance. **Soils and Foundations**, v. 46, n. 5, p. 605-612, 2006.

TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. *In*: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 3., 1996, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABMS, 1996. v. 1, p. 33-50.

VEEN, V. D. The bearing capacity of a pile. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION, 3., 1953, Switzerland. **Proceedings** [...]. Zurich: ICSMFE, 1953. v. 2, p. 84-90.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2011.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro, ao POSDEHA por possibilitar esta pesquisa e à TECNORD por dispor os dados coletados utilizados neste artigo.