

CRAVAÇÃO DE ESTACAS ESCAVADAS DE BASE ALARGADA PARA MELHORIA DA CAPACIDADE DE CARGA EM SOLO COLAPSÍVEL

DRIVING OF BELLED PILES TO IMPROVE BEARING CAPACITY ON COLLAPSIBLE SOIL

CINTRA, JOSÉ CARLOS *
BENVENUTTI, MÁRCIO **
MENEGOTTO, MAURO LEANDRO***
AOKI, NELSON ****

RESUMO

As estacas escavadas com base alargada são amplamente utilizadas como elementos estruturais de fundação em edifícios residenciais, nas cidades pequenas a médias do Brasil. São os chamados tubulões a céu aberto. Nos solos porosos e colapsíveis, presentes em várias regiões brasileiras, essas estacas não raramente têm apresentado comportamento inadequado, quando o solo é inundado. Com a significativa elevação do seu teor de umidade, esses solos exibem o recalque de colapso, caracterizando-os como colapsíveis. Como já se tem a comprovação da eficiência da compactação do solo para viabilizar o emprego de fundações rasas, por sapatas, em solos colapsíveis [1], resolveu-se estudar os possíveis benefícios da cravação de estacas escavadas de base alargada na melhoria da capacidade de carga. Os resultados são promissores.

ABSTRACT

The belled piles are largely used as foundation structural members of residential buildings at small and medium cities in Brazil. In the porous and collapsible soils, that can be found in many Brazilian regions, these piles usually have presented an inadequate behavior, when the soil is soaked. With a significant elevation on its moisture content, these soils present the collapse settlement, being characterized as collapsible. Since there is already a confirmation of compacting process efficacy in making the employment of shallow foundations on collapsible soils feasible [1], it was decided to study the possible benefits of the driving of belled piles on the improvement of the bearing capacity. The results are quite auspicious.

(*) Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, Brasil, cintrajc@sc.usp.br

(**) Perfil Engenharia de Fundações, Campinas-SP, Brasil, perfil@correionet.com.br

(***) Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, Brasil, menegott@sc.usp.br

(****) Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, Brasil, nelsonak@sc.usp.br

1. INTRODUÇÃO

No Campo Experimental de Fundações da Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, Brasil, foram executadas duas estacas com fuste de diâmetro 0,50 m e com base alargada assentada à cota -6,00 m (diâmetro de 1,50 m e altura de 0,90 m).

Essa cota não é cogitada para apoiar a base deste tipo de estaca, em projetos reais de fundações, porque o solo é compressível e colapsível. Mas as estacas foram executadas com a base apoiada nessa cota, de propósito, para pesquisar o benefício da cravação da estaca na melhoria da capacidade de carga. Por meio de ensaios estáticos sucessivos na mesma estaca, tem-se ao mesmo tempo a cravação da estaca e os novos valores de capacidade de carga.

Planejou-se ensaiar a primeira estaca na cota inicial de apoio da base e depois da cravação de 0,15 m, 0,30 m e 0,45 m, o que corresponde a 10%, 20% e 30% do diâmetro de base, respectivamente. Para a segunda estaca planejaram-se os mesmos ensaios, mas com o terreno pré-inundado, para identificar o efeito da colapsibilidade do solo.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

O Campo Experimental de Fundações abrange uma área de 1200 m² no setor sul do Campus de São Carlos da Universidade de São Paulo. As pesquisas ali desenvolvidas compreendem diversos tipos de fundação: fundações diretas, estas isoladas de diferentes tipos e geometrias, e grupos de estacas. São utilizadas várias modalidades de ensaio: provas de carga estática (lenta, rápida e mista), com carregamento à compressão, horizontal e à tração, e provas de carga dinâmica com energia crescente [2] e [3].

O perfil geotécnico desse Campo Experimental é representativo de uma vasta área do Estado de São Paulo e semelhante ao de várias outras regiões do Brasil. Sua camada superior consiste de uma areia argilosa laterizada (alúvio), marrom, com valor médio do índice de resistência à penetração SPT de 4 golpes / 30 cm.

À profundidade de cerca de 6 m, uma linha de seixos separa a camada superficial de uma camada de solo residual (saprolito), constituída por uma areia argilosa vermelha, com SPT variando de 5 a 22 golpes / 30 cm até a profundidade de 21 m.

O nível d'água varia entre 7 e 10 m de profundidade, dependendo da época do ano.

Resultados de ensaios de laboratório e de ensaios *in situ* são encontrados em Giacheti *et al.* (1993) [4].

3. ESTACAS

Para esta pesquisa, duas estacas foram escavadas mecanicamente, com fuste de 0,5 m de diâmetro. As bases, assentadas à cota -6,0 m, foram alargadas manualmente com 1,5 m de diâmetro e 0,9 m de altura. A Figura 1 mostra os detalhes geométricos das estacas.

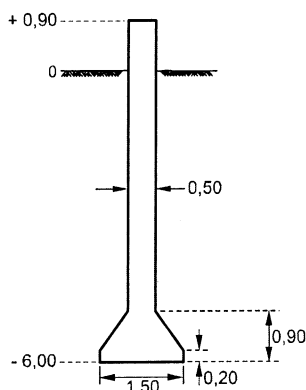


Figura 1 - Geometria das estacas

Geralmente se emprega esse tipo de estaca com diâmetro do fuste de, no mínimo, 0,60 m. Mas, para cargas admissíveis de até 800 kN, pode-se reduzir o diâmetro do fuste de 0,60 m para 0,50 m, o que implica a diminuição de 30% no volume de concreto no fuste.

Após o alargamento das bases, foi imediatamente procedida a sua concretagem. Introduziu-se a armadura de aço e, finalmente, os fustes foram concretados. O concreto era usinado, com especificação técnica de 15 MPa de resistência característica à compressão, e Slump de 8,0 cm (concreto auto-adensável). No prolongamento do fuste, com altura de 0,9 m acima da superfície do terreno, utilizou-se fôrma de madeira e um aumento da armadura de fretagem.

4. PROVAS DE CARGA

As provas de carga foram do tipo rápido, realizadas de acordo com a norma brasileira NBR 12131/91, exceto a duração dos estágios de 15 min, que seguiu a recomendação de Fellenius (1975) [5]. A reação era fornecida por uma viga de aço, com peso de 25 kN e capacidade de 2000 kN, fixada em quatro estacas metálicas do tipo trilho, com 27,0 m de comprimento, formando em planta um retângulo de 3,3 m x 4,3 m.

Empregou-se um macaco hidráulico e uma célula de carga com capacidade para 1500 kN. Os deslocamentos verticais no topo da estaca foram medidos por meio de quatro extensômetros, instalados em pares diametralmente opostos, com escala máxima de 50 mm e resolução de 0,01 mm. Durante os ensaios, os extensômetros foram reescalados para atingir recalques acumulados de 150 mm.

Cada ensaio, em ambas as estacas, foi programado para atingir o recalque máximo de cerca de 150 mm. Na estaca T1, o primeiro ensaio foi realizado em 22 estágios de 40 kN e o descarregamento em três estágios. No segundo ensaio, em estágios de 60 kN, ocorreu a ruptura do concreto no topo do tubulão, no 15º estágio, provavelmente por deficiência de estribo. Procedeu-se o reforço, e o terceiro ensaio teve início à cota -6,17 m, em vez de -6,30 m. Neste terceiro ensaio, em estágios de 60 kN, houve a ruptura de um dos trilhos do sistema de

atirantamento, no 20º estágio. Em conseqüência, não se realizou o último ensaio previsto para essa estaca.

Na segunda estaca, procedeu-se a pré-inundação do terreno por 48 h. Para isso, foi aberta uma cava de 1,5 m de diâmetro e 0,5 m de profundidade, ao redor do fuste da estaca, mantendo-se uma lâmina d'água de 0,4 m, inclusive durante a realização dos ensaios. Nessa estaca, realizaram-se normalmente os três primeiros ensaios previstos, mas por precaução, não se realizou o último. O primeiro ensaio na estaca T2 foi realizado em 21 estágios de 20 kN. O segundo e o terceiro ensaios foram realizados em estágios de 30 kN (20 e 26 estágios, respectivamente). Em todos, o descarregamento foi realizado em três estágios.

Outros detalhes dos ensaios são relatados por Benvenuti (2001) [6].

5. RESULTADOS

Apresentam-se os resultados obtidos em seis provas de carga realizadas em duas estacas, sendo três provas de carga sucessivas em cada uma.

Nas Figuras 2 e 3, apresentam-se as curvas carga x recalque obtidas nos três ensaios das estacas T1 e T2, respectivamente, considerando-se os recalques acumulados.

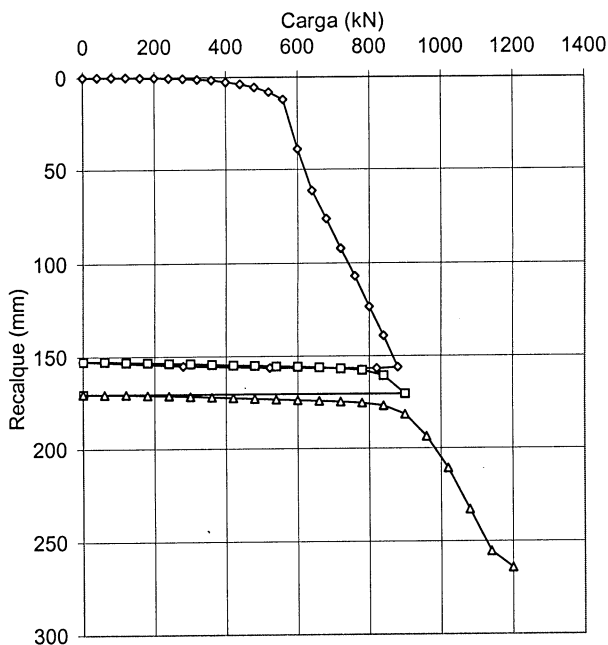


Figura 2 - Curvas carga x recalque (estaca T1)

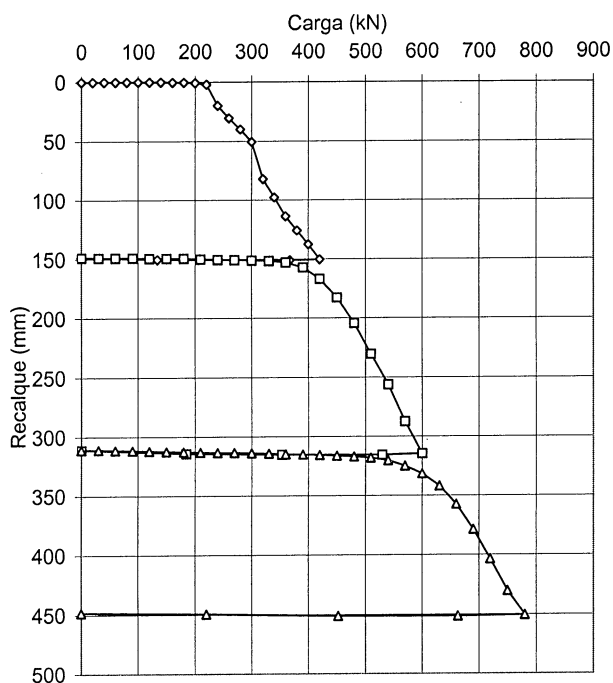


Figura 3 - Curvas carga x recalque (estaca T2 - terreno pré-inundado)

Os Quadros 1 e 2 apresentam os valores máximos de carga (Q_{\max}) e de recalque na cabeça da estaca (ρ_{\max}) atingidos em cada ensaio das estacas T1 e T2, respectivamente, bem como os valores de recalque permanente (ρ_o), correspondentes ao descarregamento.

Quadro 1 - Ensaios da estaca T1

Ensaio	Q_{\max} (kN)	ρ_{\max} (mm)	ρ_o (mm)
1	880	155,90	152,56
2	900	170,35	-
3	1200	262,62	-

Quadro 2 - Ensaios da estaca T2 (terreno pré-inundado)

Ensaio	Q_{\max} (kN)	ρ_{\max} (mm)	ρ_o (mm)
1	420	150,62	148,95
2	600	316,46	312,81
3	780	453,05	450,84

6. ANÁLISES E CONCLUSÕES

6.1 Curvas carga x recalque

As curvas carga x recalque, obtidas nas provas de carga das duas estacas, não caracterizam uma ruptura nítida nem permitem a aplicação de um critério de ruptura física, como o de Van Der Veen (1953) [7], por exemplo.

Todas as curvas exibem um trecho inicial linear, correspondente a pequenos valores de recalque, e um segundo trecho também linear no qual a resistência mobilizada pelo sistema estaca-solo cresce continuamente com o aumento do recalque. É interessante observar que a parte final da curva carga x recalque dos sucessivos ensaios de uma mesma estaca constituem um único trecho reto. As equações desse trecho reto final, para as estacas T1 e T2, obtidas por regressão linear, são respectivamente

$$Q = 2,453 \rho + 503 \quad (1)$$

e

$$Q = 1,221 \rho + 225 \quad (2)$$

onde Q é a carga aplicada (em kN) e ρ é o recalque medido (em mm). Os respectivos valores do coeficiente de correlação R^2 são 0,9967 e 0,9985.

Quanto aos recalques permanentes, observa-se que são praticamente iguais aos recalques máximos alcançados nas sucessivas provas de carga de cada estaca. Isso demonstra a quase inexistência de deformações elásticas neste tipo de solo. Essa predominância absoluta de deformações plásticas tem sido um comportamento típico em todas as provas de carga realizadas neste campo experimental.

6.2 Capacidade de carga

Na interpretação das curvas carga x recalque, utilizou-se o critério de ruptura convencional de Terzaghi (1942) [8], pelo qual a carga de ruptura do sistema é aquela correspondente a um recalque de 10% do diâmetro da base, neste caso um recalque de 150 mm. Desse modo, na condição inicial e após a cravação de 0,15 m, 0,30 m e 0,45 m, os valores da carga de ruptura convencional correspondem, respectivamente, aos recalques de 150, 300, 450 e 600 mm, acumulados desde o primeiro ensaio.

A partir deste critério, foram obtidos os valores de capacidade de carga (Q_u) apresentados no Quadro 3 e de carga de colapso (Q_c) apresentados no Quadro 4, correspondentes às estacas T1 e T2, respectivamente. Quando necessário, extrapolou-se o trecho linear definido nos ensaios, para ambas as estacas.

Utilizou-se a terminologia introduzida por Cintra (1998) [9], pela qual, na condição de terreno inundado, a “carga de ruptura” é denominada carga de colapso.

Quadro 3 - Capacidade de carga (estaca T1)

CRAVAÇÃO (m)	CAPACIDADE DE CARGA Q_u (kN)	MAJORAÇÃO
-	871	
0,15	1239	42%
0,30	1607	85%
0,45	1975	127%

Quadro 4: Carga de colapso (estaca T2 - terreno pré-inundado)

CRAVAÇÃO (m)	CARGA DE COLAPSO Q_c (kN)	MAJORAÇÃO
-	408	
0,15	591	45%
0,30	774	90%
0,45	958	135%

Nesses quadros, observa-se o excelente benefício da cravação das estacas no aumento da capacidade de carga. Para a estaca T1, obtém-se uma capacidade de carga inicial de apenas 871 kN. Mas com a cravação de cada 0,15 m, a capacidade de carga aumenta mais 42%.

Para a estaca T2 a carga de colapso aumenta mais 45%, com a cravação de cada 0,15 m.

6.3 Carga correspondente ao recalque máximo admissível

Para este tipo de fundação, usualmente adota-se em projeto o recalque máximo admissível de 30 mm. Desse modo, na condição inicial e após a cravação de 0,15 m, 0,30 m e 0,45 m, os valores da carga (Q_{pmax}) correspondente ao recalque máximo admissível referem-se, respectivamente, aos recalques de 30, 180, 330 e 480 mm, acumulados desde o primeiro ensaio. Os valores de Q_{pmax} obtidos para a estaca T1 são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5: Carga correspondente ao recalque máximo admissível (estaca T1)

CRAVAÇÃO (m)	CARGA Q_{pmax} (kN)	MAJORAÇÃO
-	577	
0,15	945	64%
0,30	1312	127%
0,45	1680	191%

Observa-se que a cravação de cada 0,15 m aumenta mais 64% na carga correspondente ao recalque máximo admissível.

6.4 Carga admissível

Pela norma brasileira de projeto e execução de fundações (NBR 6122/96), deve-se fazer a verificação simultânea dos estados-limite último e de utilização. Para valores obtidos em provas

de carga, são impostos os coeficientes de segurança 2,0 e 1,5 à carga de ruptura e à carga que provoca o recalque máximo admissível, respectivamente.

A correta aplicação do conceito de carga admissível envolve a obtenção dos valores médios de capacidade de carga e de carga que provoca o recalque máximo admissível, os quais são divididos pelos respectivos coeficientes de segurança [10] [11]. Neste caso, considerou-se que os resultados obtidos representam valores "médios", isto é, que os ensaios das estacas T1 e T2 são representativos das condições de terreno não-inundado e de terreno inundado, respectivamente.

Para a estaca T1, aplicando-se os coeficientes de segurança de norma aos valores apresentados nos Quadros 3 e 5, e tomando-se o menor dos resultados, para cada quantidade cravada, obtêm-se os valores da carga admissível (Q_a) apresentados no Quadro 6.

Quadro 6: Carga admissível (estaca T1)

CRAVAÇÃO (m)	CARGA ADMISSÍVEL Q_a (kN)	MAJORAÇÃO
-	385	
0,15	619	61%
0,30	803	109%
0,45	987	156%

Voltando às curvas carga x recalque da Figura 2, constata-se que os recalques são nulos para esses valores de carga admissível, exceto para a condição inicial (estaca não-cravada), cujo recalque é de 2,12 mm. Para a condição de estaca cravada de 0,15 m, por exemplo, os recalques somente ocorrem após a aplicação da carga de 871 kN e, portanto, para uma carga admissível de 619 kN (Quadro 6) os recalques são nulos.

6.5. Influência da colapsibilidade

A comparação dos Quadros 3 e 4 mostra que os valores da capacidade de carga relativos aos ensaios da estaca T2 são significativamente menores do que os da estaca T1.

A relação entre os respectivos valores, para a mesma quantidade de cravação das estacas, permite quantificar a redução de capacidade de carga devido ao efeito de colapsibilidade do solo, uma vez que os ensaios da estaca T2 foram realizados com pré-inundação do terreno. Os valores percentuais de redução da capacidade de carga estão apresentados no Quadro 7.

Outra forma de analisar o efeito da colapsibilidade do terreno é aplicar os valores de carga admissível, calculados anteriormente (Quadro 6), nas curvas carga x recalque da Figura 3. Conforme apresentado no Quadro 8, os recalques seriam muito elevados. É por isso que as fundações têm comportamento inadequado em solo colapsível quando a carga admissível é determinada sem considerar o efeito da colapsibilidade.

Quadro 7: Redução de capacidade de carga

CRAVAÇÃO (m)	CAPACIDADE DE CARGA (kN)		REDUÇÃO
	ESTACA T1	ESTACA T2	
-	871	408	53%
0,15	1239	591	52%
0,30	1607	774	52%
0,45	1975	958	51%

Quadro 8: Recalques (terreno pré-inundado)

CRAVAÇÃO (m)	CARGA ADMISSÍVEL Q_a (kN)	RECALQUE (mm)
-	385	131,04
0,15	619	172,69
0,30	803	173,38
0,45	987	174,08

Cintra (1998) preconiza a adoção de um coeficiente de segurança 1,5 ao valor médio da carga de colapso, para projetar fundações em solos colapsíveis. A aplicação desse coeficiente de segurança aos valores da carga de colapso do Quadro 4 resulta os valores de carga admissível apresentados no Quadro 9.

Quadro 9: Carga admissível (com verificação ao colapso)

CRAVAÇÃO (m)	CARGA ADMISSÍVEL Q_a (kN)	MAJORAÇÃO
-	272	
0,15	394	45%
0,30	516	90%
0,45	639	135%

Aplicando esses novos valores de carga admissível à Figura 3, constata-se que os recalques serão nulos, na situação de terreno inundado, exceto para a condição inicial (estaca não-cravada), cujo recalque será de 38,49 mm. Para que este recalque também seja nulo, a correspondente carga admissível deve ser diminuída de 272 para 225 kN.

Comparando-se os Quadros 6 e 9, observa-se que a carga admissível, obtida com segurança ao colapso do solo, é cerca de 36% inferior à carga admissível encontrada sem considerar o efeito da colapsibilidade do solo.

7. OBSERVAÇÕES FINAIS

A significativa melhoria do comportamento do elemento isolado de fundação, obtida pela cravação da estaca escavada, deve-se à conseqüente redução do índice de vazios do solo de suporte da base da estaca.

Objetivando uma aplicação prática desta pesquisa, propõe-se que a cravação das estacas escavadas seja feita por meio de bate-estaca, com simultânea realização de provas de carga dinâmica, de forma a cravar cada estaca até que seja comprovada a capacidade de carga especificada em projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Souza, A.; Cintra, J.C.A.; Vilar, O.M. (1995). Shallow foundations on collapsible soil improved by compaction. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, França, v. 2, p. 1017-1021.
- [2] Cintra, J.C.A. *et al.* (1991). Campo experimental de fundações em São Carlos. II Seminário de Fundações Especiais, ABMS, São Paulo, Brasil, v. 1, p. 96-105.
- [3] Cintra, J.C.A.; Carneiro, B.J.I. (1998). Ampliação do Campo Experimental de Fundações da USP / São Carlos. XI Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, ABMS, Brasília, v. III, p. 1505-1510.
- [4] Giacheti, H.L. *et al.* (1993). Propriedades geotécnicas do Sedimento Cenozóico. Solos do Interior de São Paulo, Editora ABMS/NRSP, Cintra, J.C.A. e Albiero, J.H. (editores), São Paulo, Brasil, Cap. 6, p. 143-175.
- [5] Fellenius, B.H. (1975). Test loading of piles and new proof testing procedure. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101 (9), p. 855-869.
- [6] Benvenuti, M. (2001). Cravação de Tubulões a Céu Aberto para Melhoria da Capacidade de Carga em Solos Colapsíveis. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, São Carlos - SP, Brasil, 162 p.
- [7] Van der Veen, C. (1953). The bearing capacity of a pile. 3rd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., London, v. 2, p. 66-71.
- [8] Terzaghi, K. (1942). Discussion on pile driving formulas. Progress report of the committee on the bearing value of pile foundation. Proc. ASCE, 68 (2), p. 311-323.
- [9] Cintra, J.C.A. (1998). Fundações em Solos Colapsíveis. Editora EESC-USP, São Carlos - SP, Brasil, 106 p.
- [10] Cintra, J.C.A.; Aoki, N. (1999). Carga Admissível em Fundações Profundas. Editora EESC-USP, São Carlos - SP, Brasil, 61 p.
- [11] Aoki, N.; Cintra, J.C.A. (2000). Carga Admissível e Carga Característica em Fundações por Estacas. Solos e Rochas, Revista Latino-americana de Geotecnia, São Paulo - SP, Brasil, 23 (2), ago, p. 137-142.