

Estaca Piloto Instrumentada – Uma Ferramenta de Campo para a Determinação da Capacidade de Carga de Estacas

Luana Cavanha Pagoto
UNESP, Ilha Solteira, Brasil, luana.pagoto@gmail.com

Adriano Souza
UNESP, Ilha Solteira, Brasil, adriano@dec.feis.unesp.br

Faiçal Massad
EPUSP, São Paulo, Brasil, faissal@usp.br

RESUMO: A interiorização da industrialização no estado de São Paulo gerou um rápido aumento no número de obras construídas, impondo aos engenheiros de fundações a necessidade de maior conhecimento técnico a respeito das estacas escavadas de pequeno diâmetro, que são as fundações mais usuais. A pesquisa foi realizada no Campo Experimental de Fundações da Unesp de Ilha Solteira, onde foram realizadas provas de carga em protótipos de estacas ($\varnothing = 25$ cm e $L = 6$ m) e utilizado resultados de ensaios com uma estaca piloto instrumentada ($\varnothing = 10$ cm e $L = 9$ m), com o intuito de avaliar e quantificar a capacidade de carga das estacas, em função do diâmetro e do comprimento. A capacidade de carga ou carga de ruptura (Q_r) de uma estaca solicitada por esforços de compressão é definida pela soma das parcelas de carga de atrito lateral ($Q_{s,r}$) e carga de ponta ($Q_{p,r}$), ambas na ruptura. Sua determinação é feita com a realização de provas de carga, que além do alto custo definem apenas a carga de ruptura. A instrumentação destas estacas, que não é usual em obras, aumentaria ainda mais o custo. Buscando uma solução prática, rápida e econômica, foram utilizados os valores das resistências de atrito lateral no fuste ($f_{máx}$) e de ponta ($q_{p,r}$) auferidos pela estaca piloto, possibilitando a determinação dos valores das parcelas de carga de atrito lateral e de ponta. A carga de ruptura de 175 kN obtida na prova de carga e a auferida pela estaca piloto de 171,2 kN se diferenciam em 2,2%. A estaca piloto propiciou, também, a determinação da carga de atrito lateral ($Q_{s,r} = 76,8$ kN) e a carga de ponta ($Q_{p,r} = 101,8$ kN), ambas na ruptura, definindo que a contribuição na capacidade de carga do atrito lateral é de 43% e da ponta de 57%. Os resultados obtidos corroboram com a validação da estaca piloto instrumentada, como equipamento de campo para determinação da capacidade de carga e estudo da transferência de carga ao solo.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação, Estaca Piloto Instrumentada, capacidade de carga, transferência de carga, resistência de ponta, atrito lateral.

1 INTRODUÇÃO

Os projetos de fundação consistem em superar dificuldades e desafios, tal como Tomlinson (1992) descreveu: “A arte de projetar fundações em estacas é extremamente complexa, porém, para o engenheiro de fundações, torna-se uma atividade excitante e instigante”.

A determinação da capacidade de carga de

uma fundação em estaca é de grande importância para a engenharia de fundações, pois nos projetos busca-se conciliar menor custo com segurança.

A região noroeste do Estado de São Paulo é coberta por uma camada de solo colapsível, fato este que acaba impondo a utilização de estacas de pequeno diâmetro (broca) para edificações de pequeno a médio porte.

Esta necessidade resultou na concepção de um equipamento de campo que fornece valores de atrito lateral unitário máximo ($f_{m\acute{a}x}$) e de resistência de ponta ($q_{p,r}$) com rapidez e acurácia.

O equipamento criado foi uma estaca piloto instrumentada, exaustivamente ensaiada no Campo Experimental de Fundações da FEIS-Unesp, na cidade de Ilha Solteira (SP).

Os resultados obtidos para os valores de carga de atrito lateral ($Q_{s,r}$) e de ponta ($Q_{p,r}$), com os valores auferidos pela estaca piloto foram ótimos, ficando muito próximos aos definidos em provas de carga realizadas com estacas instrumentadas de tipos, diâmetros e comprimentos variados, e, ainda, excelentes valores de carga de ruptura (Q_r) para outras diversas estacas não instrumentadas instaladas e ensaiadas.

O caráter colapsível do solo que cobre a região noroeste do Estado de São Paulo, praticamente impõe a utilização de fundações em estacas de pequeno diâmetro nas edificações de pequeno e médio porte, aumentando a responsabilidade do engenheiro de fundações, obrigando-o a um refino na determinação da capacidade de carga destas fundações, de maneira a conciliar economia com segurança.

Esta resposta tem sido delegada a grupos de pesquisa reunindo professores pesquisadores, pós-graduandos e graduandos, todos vinculados a instituições de ensino superior de engenharia civil, e é desta maneira que a Unesp de Ilha Solteira tem respondido e divulgado no meio técnico com a publicação de artigos científicos, relatórios técnicos, teses, consultorias e/ou assessorias prestadas.

O estudo do comportamento de estacas instaladas no solo, sob a ação de carregamentos, faz-se necessário na compreensão da interação solo-estaca, tanto com respeito à capacidade de carga quanto à transferência de carga ao solo.

2 METODOLOGIA

A NBR 6122/2010 define que a capacidade de carga (Q_r) de uma estaca é determinada pelo menor valor entre a resistência estrutural do material (ou materiais) que compõe o elemento

de fundação e a resistência do solo que dá suporte. Normalmente o solo é o elo mais fraco desse binômio (Alonso, 1998).

De acordo com os estudos de Vésic (1975), a ruptura estrutural da estaca ocorrerá quando a tensão axial atuante no seu fuste atinge um valor maior que a tensão de ruptura do material. Essa situação poderá ocorrer caso a ponta da estaca esteja apoiada sobre superfície muito rígida, como por exemplo: areia extremamente densa, argila muito rija ou sobre rocha.

Uma carga axial de compressão aplicada no topo de uma estaca é transmitida ao solo, ao longo do fuste e pela ponta. Assim, a capacidade de carga ou carga de ruptura (Q_r) é definida pela Equação 1:

$$Q_r = Q_{s,r} + Q_{p,r} \quad (1)$$

em que:

$Q_{s,r}$: carga de atrito lateral, na ruptura, e
 $Q_{p,r}$: carga de ponta, na ruptura.

Afirmando que a carga vertical atuante será transmitida ao solo em partes pelo fuste e em partes pela ponta da estaca, essas parcelas de carga atuam na área lateral ao fuste e da ponta, assim podendo mobilizar as tensões limitantes de cisalhamento ao longo do fuste (atrito lateral unitário máximo na ruptura) e, no nível da ponta a tensão normal de ruptura (resistência de ponta na ruptura). Logo, escreve-se a Equação 2:

$$Q_r = \sum_{i=1}^n f_{m\acute{a}x,i} \cdot A_{s,i} + q_{p,r} \cdot A_p \quad (2)$$

em que:

$f_{m\acute{a}x,i}$: atrito lateral unitário máximo na seção “i” da estaca;
 $q_{p,r}$: resistência de ponta da estaca;
 $A_{s,i}$: área lateral da estaca na seção “i”; e
 A_p : área da seção transversal da ponta da estaca.

As áreas lateral da estaca na seção “i” e da seção transversal da ponta da estaca, são determinadas, respectivamente, pelas Equações 3 e 4:

$$A_{s,i} = \pi \cdot D \cdot \Delta l_i \quad (3)$$

$$A_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4)$$

em que:

π : pi, constante matemática ($\approx 3,14159$);

D: diâmetro da estaca, e

Δl_i : comprimento da seção “i” da estaca.

Já, o atrito lateral unitário máximo na seção “i” da estaca ($f_{m\acute{a}x,i}$) e a resistência de ponta da estaca ($q_{p,r}$) são, normalmente, determinados por métodos semi-empíricos, entre os quais se destacam: Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), que dependem de valores de N obtidos em ensaios SPT ou de valores de f_s e q_c obtidos em sondagens CPT, e que, em alguns casos, levam a determinação de valores de $Q_{s,r}$, $Q_{p,r}$ e Q_r que divergem dos obtidos em provas de carga.

Portanto, o que se propõe é usar os valores de $f_{m\acute{a}x,i}$ e $q_{p,r}$ auferidos pela estaca piloto, apresentados, respectivamente, nas Figuras 1 e 2.

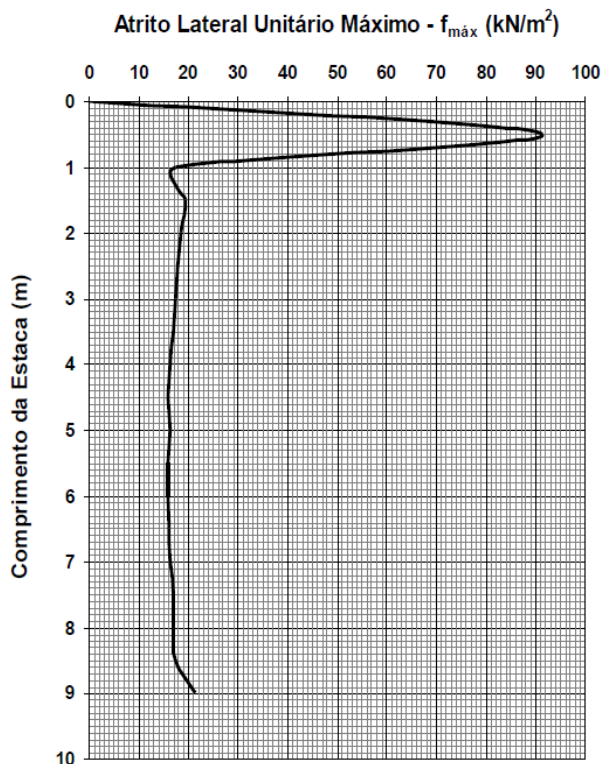


Figura 1. Gráfico de atrito lateral unitário máximo ($f_{m\acute{a}x}$) ao longo da profundidade. Souza (2001).

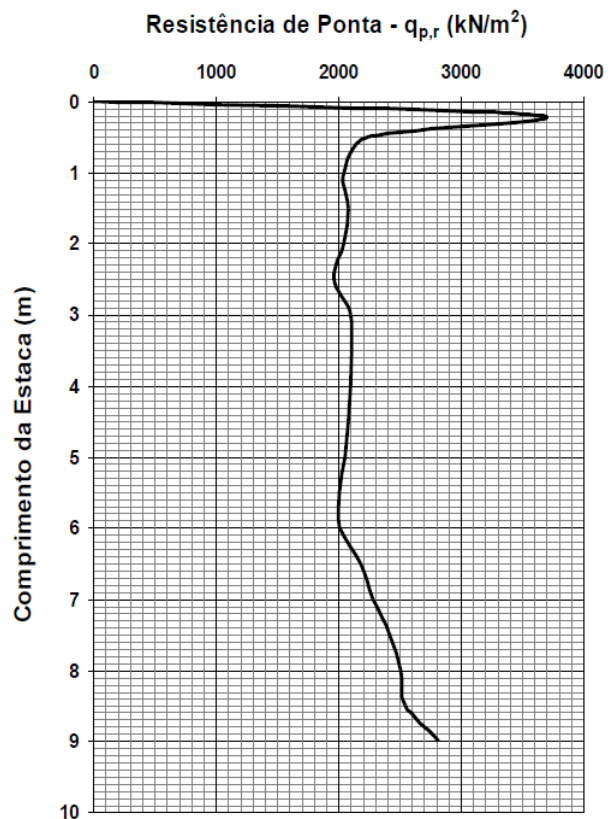


Figura 2. Gráfico de resistência de ponta ($q_{p,r}$) ao longo da profundidade. Souza (2001).

A transferência das cargas de ponta e a de atrito ao longo do fuste da estaca para o solo decorre das suas pressões de contato com o mesmo e dependem do movimento vertical da estaca, que provoca o surgimento de tensões de cisalhamento, dando origem à reação de ponta e ao atrito lateral ao longo do fuste (Vésic, 1975; Aoki e Alonso, 1992).

Diversos estudos têm sido condizidos a respeito dos mecanismos de transferência de carga em sistemas solo-estaca, tais como: formulações analíticas, assumindo o solo como meio elástico ou elasto-plástico, ensaios com modelos em laboratório, provas de carga com estacas instrumentadas e estacas piloto com e sem instrumentação. Em geral as formulações analíticas procuram apoio nos ensaios e provas de carga, para a sua validação.

As provas de carga realizadas com estacas instrumentadas ou estacas piloto têm o objetivo de estudar o mecanismo da transferência de carga ao solo. As instrumentações normalmente empregadas no Brasil são: extensômetros mecânicos (*tell tales*) e barras instrumentadas

com extensômetros elétricos (*strain gages*).

A carga em um nível instrumentado qualquer do fuste de uma estaca é dada em função do atrito lateral unitário (f) atuante na área lateral da estaca (Figura 3).

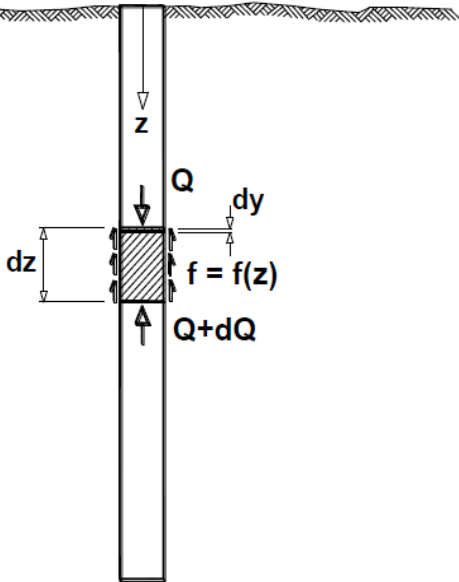


Figura 3. Esquema de transferência de carga e deformação de uma seção da estaca. Souza (2001).

Considere-se um elemento de estaca com altura dz , como se mostra na Figura 3. A carga normal axial (Q), atuante no topo do elemento, pode ser obtida através de uma equação de equilíbrio e da aplicação da Lei de Hooke. O equilíbrio de forças mostradas na Figura 3 é definida pela Equação 5:

$$\frac{dQ}{dz} = -\pi \cdot D \cdot f \quad (5)$$

em que:

- dQ : carga transferida ao solo no trecho dz ;
- dz : altura do elemento (trecho) de estaca analisado; e
- f : atrito lateral unitário.

A deformação do elemento de estaca pode ser calculada pela Lei de Hooke, utilizando-se a Equação 6:

$$\varepsilon = -\frac{dy}{dz} = \frac{Q}{E \cdot A} \quad (6)$$

em que:

- ε : deformação específica do elemento;
- dy : encurtamento da estaca no trecho dz ;
- E : módulo de elasticidade do material da estaca; e
- A : área da seção transversal da estaca.

Portanto, a determinação da carga Q é feita com a Equação 7:

$$Q = \varepsilon \cdot E \cdot A \quad (7)$$

Em provas de carga instrumentadas a medida da deformação específica do elemento (ε) pode ser feita diretamente, com a utilização de extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*), ou indiretamente, através da medida de deslocamentos, com os *tell-tales*, instalados em várias secções ou níveis, em profundidade. A aplicação da Equação 7 conduz ao primeiro dos diagramas de transferência de carga, ilustrado na Figura 4. Note-se que existem tantas curvas quantos forem os estágios de carregamento, durante a prova de carga.

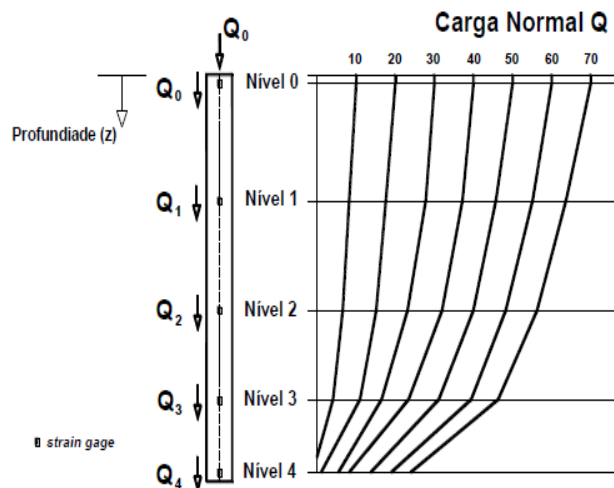


Figura 4. Estaca instrumentada e resultados da transferência de carga. Souza (2001).

Com as cargas atuantes nos pontos instrumentados é possível determinar o atrito lateral unitário (f), utilizando-se a Equação 5, ou simplesmente a Equação 8:

$$f = \frac{dQ}{A_s} \quad (8)$$

em que:

dQ : diferença de carga entre dois pontos instrumentados; e

A_s : área da superfície lateral da estaca no trecho em que se obteve dQ .

A Figura 5 mostra o gráfico do atrito lateral unitário ao longo do fuste de uma estaca, para um dado estágio de carregamento.

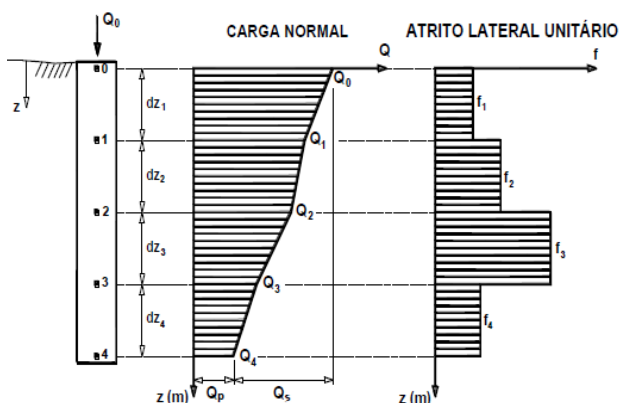
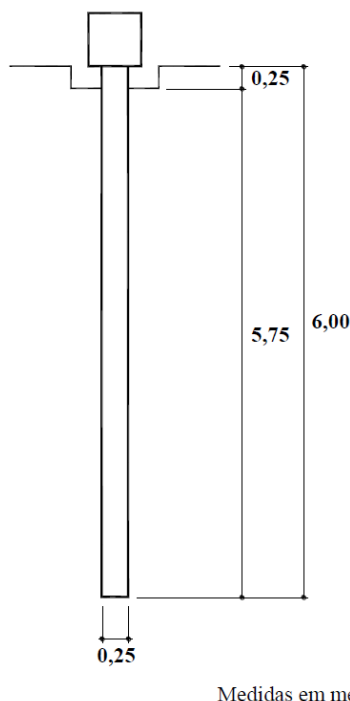


Figura 5. Diagramas de transferência de carga. Souza (2001).

A estaca escavada de pequeno diâmetro ensaiada por Carvalho e Souza (1990) apresenta as características mostradas na Figura 6.



Medidas em metro

Figura 6. Esquema da estaca ensaiada. Carvalho e Souza (1990).

A estaca tem as seguintes dimensões:

- Diâmetro (D) = 0,25 m

- Comprimento (L) = 6,00 m

- Embutimento no solo (L_e) = 5,75 m

A prova de carga realizada por Carvalho e Souza (1990) determinou uma carga de ruptura de 175,9 kN.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Substituindo as dimensões da estaca (D e L_e) nas Equações 3 e 4 obtém-se, respectivamente, as áreas lateral da estaca na seção “i” e da seção transversal da ponta da estaca. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Áreas lateral e da ponta da estaca.

A_s (m ²)	A_p (m ²)
4,52	0,0491

Para obter os valores do atrito lateral unitário máximo ($f_{máx,i}$) e da resistência de ponta ($q_{p,r}$) que atuam na estaca, basta o comprimento da estaca ($L = 6$ m) e verificar, respectivamente, nos gráficos das Figuras 1 e 2 os valores de $f_{máx,i}$ e $q_{p,r}$ quando $L = 6$ m. A Tabela 2 apresenta os valores de $f_{máx,i}$ e $q_{p,r}$ obtidos, respectivamente, em tais gráficos.

Tabela 2. Valores de $f_{máx,i}$ e $q_{p,r}$ obtidos.

$f_{máx,i}$ (kN/m ²)	$q_{p,r}$ (kN/m ²)
4,52	0,0491

As parcelas de carga de atrito lateral ($Q_{s,r}$) e de ponta ($Q_{p,r}$), são determinadas com as Equação 2, da mesma forma que a capacidade decarga (Q_r), valores estes que são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de $f_{máx,i}$ e $q_{p,r}$ obtidos.

A_s (m ²)	$f_{máx,i}$ (kN/m ²)	$Q_{s,r}$ (kN)	A_p (m ²)	$q_{p,r}$ (kN/m ²)	$Q_{p,r}$ (kN)	Q_r (kN)
4,52	16	72,3	0,0491	2010	98,7	171,0
Lateral (%)		42,3	Ponta (%)		57,7	

A análise da Tabela 3 mostra que a parcela de carga de atrito lateral contribui com 42,3% da capacidade de carga, já a ponta contribui com 57,7%.

Na Tabela 4 é feita a comparação da capacidade de carga auferida pela estaca piloto (EPI) e a determinada pela prova de carga (PC).

Tabela 4. Capacidade de carga – PC versus EPI.

Determinação	Q_r (kN)	$Q_{r,PC}/Q_{r,EPI}$	Diferença (%)
Prova de Carga	175,9		
Estaca Piloto	171,0	1,029	2,9

A capacidade de carga auferida pela estaca piloto de 171,0 kN ficou abaixo da determinada pela prova de carga de 175,9 kN, com uma relação entre as duas de $Q_{r,PC}/Q_{r,EPI} = 1,029$, ou seja, uma diferença de 2,9%, demonstrando desta forma que a estaca piloto é um equipamento de campo confiável e de ótima precisão.

4 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nesta pesquisa podemos concluir que:

- (1) A parcela de carga de atrito lateral contribui com 42,3% da capacidade de carga e a ponta contribui com 57,7%;
- (2) A capacidade de carga auferida pela estaca piloto de 171,0 kN ficou abaixo da obtida na prova de carga de 175,9 kN, uma diferença de 2,9%, e
- (3) A estaca piloto demonstrou ser um equipamento de campo confiável e de ótima precisão.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fapesp pelo financiamento do projeto de pesquisa que concebeu a Estaca Piloto Instrumentada, bem como possibilitou a implantação do Campo Experimental de Fundações da Unesp de Ilha Solteira.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2010). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-6122: Estacas - Projeto e execução de fundações*, Rio de Janeiro, 33 p.
- Alonso, U.R. (1998). *Previsão e controle das fundações*. Edgard Blücher, São Paulo, 2ª reimpressão, p. 59-107.

- Aoki, N.; Velloso, D.A. (1975). An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: *Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 5, Buenos Aires, Proceedings, Buenos Aires, v. 1, p. 367-376.
- Aoki, N.; Alonso, U.R. (1992). *Previsão do comportamento de estacas*. Apostila - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1992.
- Carvalho, D.; Souza, A. (1990). Análise do efeito do umedecimento do solo em fundações rasas e profundas em solos porosos. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, 9, Salvador, ABMS/ABGE, Anais, Salvador, v. 2, p. 109-114.
- Décourt, L.; Quaresma, A.R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, 6, Rio de Janeiro, ABMS, Anais, Rio de Janeiro, p. 15-53.
- Souza, A. (2001). Estaca Piloto Instrumentada: Uma ferramenta para o estudo da capacidade de carga de estacas quando submetidas a esforços axiais de compressão. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP de São Paulo, 2001, 293 p.
- Tomlinson, J. (1992). *Foundation design and construction*. Pitman, 2nd edition, London, 1992.
- Vésic, A.S. (1975). *Principles of pile foundation design* – Lecture 1. Lecture Series on Deep Foundations, Boston Society of Civil Engineers Section – ASCE, 1975, March-April, 50 p.