

XX Encontro de Iniciação à Pesquisa

Universidade de Fortaleza
20 à 24 de Outubro de 2014

Aplicação do método de Aoki (2013) para determinação da capacidade de carga em estacas considerando o embuchamento no amostrador SPT.

Beatriz Rodrigues Soares 1* (IC), Marcos Fábio Porto de Aguiar 2 (PQ), Yago Machado Pereira de Matos 3 (IC), Ícaro Rodrigues Marques 4 (IC), João Paulo Ramalho Moreira 5 (IC), Fernando Feitosa Monteiro 6 (IC).

1. Universidade de Fortaleza – PIBIC/CNPQ
 2. Universidade de Fortaleza – Curso Engenharia Civil
 3. Universidade de Fortaleza – PBIC/FUNCAP
 4. Universidade de Fortaleza – PAVIC/UNIFOR
 5. Universidade de Fortaleza – Curso Engenharia Civil
 6. Universidade de Fortaleza – Curso Engenharia Civil
- beatrizrodsoares@icloud.com

Palavras-chave: Capacidade de carga. Métodos semiempíricos. Embuchamento. Estacas.

Resumo

Este trabalho visa comparar a aplicabilidade do método apresentado por Aoki (2013) para a determinação da capacidade de carga em estacas utilizando como índice de cálculo a recuperação do solo no amostrador-padrão do SPT. Para análise da viabilidade deste método, o mesmo foi comparado com os métodos semiempíricos tradicionalmente utilizados para o cálculo da capacidade de carga, estes métodos foram: Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Os dados utilizados para tal comparação foram obtidos a partir de sondagens realizadas por duas empresas distintas no Campo Experimental localizado na Universidade de Fortaleza (Unifor). Dentro da área de estudo, estavam locados três pontos para determinação do perfil do subsolo. As empresas, representadas por E1 e E2, realizaram sondagens nesses três pontos, com uma distância de um metro da sondagem de uma para a outra. Por fim, foi calculada a capacidade de carga com base em cada um dos quatro métodos utilizados. Constatou-se que o método apresentou resultados compatíveis com os demais métodos usualmente empregados no Brasil.

Introdução

Com o intuito de determinar aspectos sociais, locais e físicos de um terreno para construção, inicia-se um projeto de uma obra com os estudos preliminares do mesmo. Dentre os aspectos físicos analisados, destaca-se a importância do reconhecimento do subsolo, visto que o solo é o meio que suporta as cargas da superestrutura. A investigação do subsolo é realizada por procedimentos conhecidos como sondagens, que permitem obter dados sobre o estado natural do solo.

No Brasil, e na maioria dos países do mundo, a sondagem mais executada é o SPT (“Standard Penetration Test”), também conhecida como sondagem de simples reconhecimento a percussão. Segundo ABNT (2001), este ensaio tem como finalidade determinar as camadas de solo em suas respectivas profundidades, a posição do nível d’água e os índices de resistência à penetração (N) a cada metro. Este índice é determinado pelo número de golpes correspondentes à cravação dos 30 cm finais do amostrador-padrão. A **Figura 01** é um esquema resumido da metodologia do ensaio SPT.

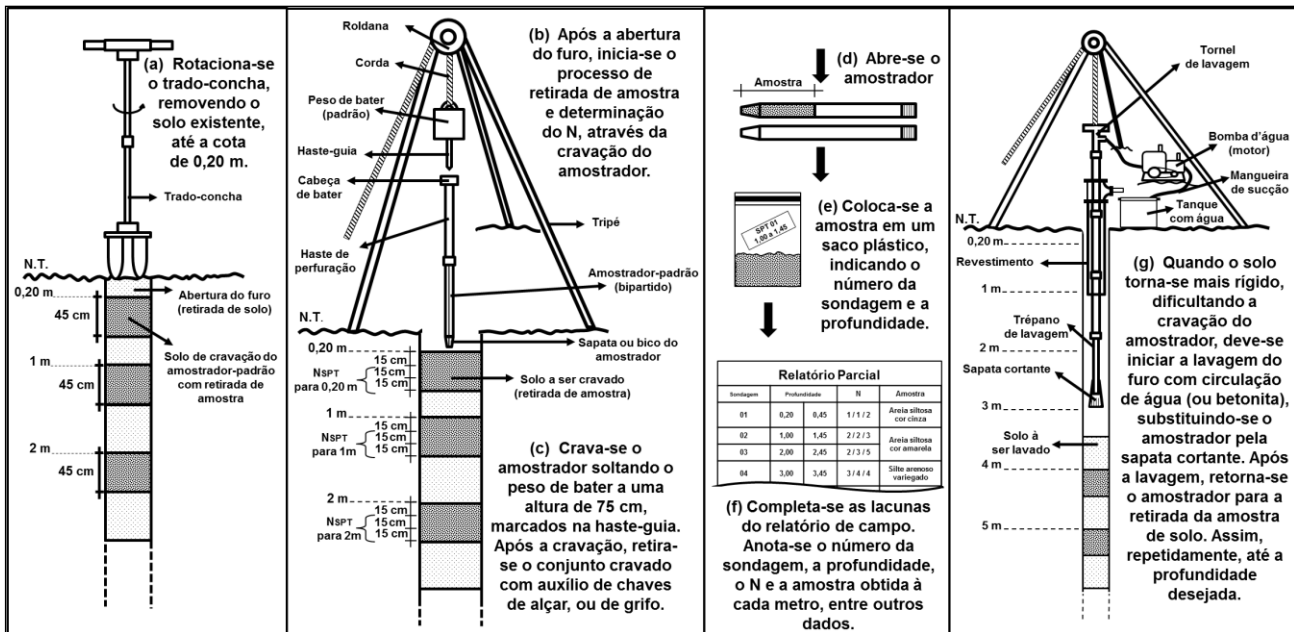


Figura 01: Resumo ilustrado da sondagem do tipo SPT.

Fundação é o termo pelo qual se denomina o elemento estrutural que transmite as cargas da superestrutura, e do peso próprio, ao solo de apoio. Elemento de fundação, por sua vez, é o sistema formado pela fundação (elemento estrutural) e pelo maciço geológico que a envolve (elemento geotécnico). Esse sistema deve interagir de maneira que o elemento estrutural resista às tensões causadas pelos esforços solicitantes, e o elemento geotécnico possua rigidez apropriada para não sofrer ruptura e não apresentar deformações diferenciais exagerados. O projeto de fundações, portanto, é elaborado a partir da sondagem, que detecta as camadas resistentes do subsolo, e do projeto estrutural, que informa a carga total da estrutura a ser construída, determinando, assim, o melhor tipo de fundação, visando segurança e economia, para tal construção. As fundações são classificadas em dois tipos: rasas (ou superficiais ou diretas) e profundas (ou indiretas), a **Figura 02** mostra a diferença entre estas.

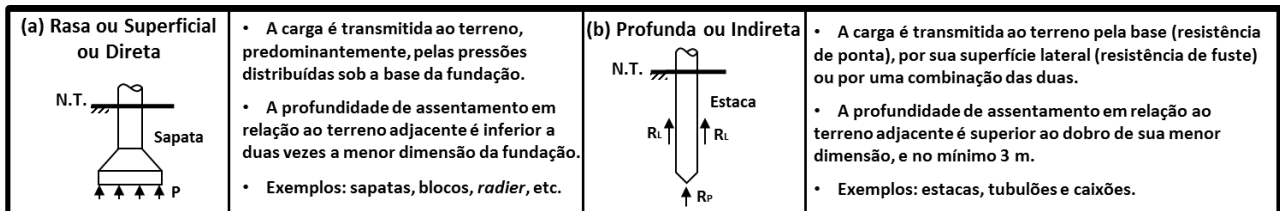


Figura 02: Tipos de fundações.

O mecanismo de transmissão de cargas das estacas pode se dar pelo atrito lateral e pela resistência de ponta, como pode se observar na **Figura 02 (b)**. Quando uma estaca é submetida a um carregamento gradativamente elevado (Q), ocorre uma mobilização parcial do atrito lateral (R_L) em certos segmentos do fuste, de forma que, em certo carregamento ($Q_1 > Q$), esta mobilização é máxima para todos os segmentos ($R_{Lmáx.}$), iniciando neste momento a mobilização da resistência de ponta (R_P). Ao elevar-se ainda mais a carga aplicada ($Q_2 > Q_1$) a resistência de ponta também atingirá um valor máximo ($R_{Pmáx.}$), a partir deste momento, a estaca tenta a deslizar incessantemente para baixo, já que o sistema não é capaz de mobilizar resistência. Para essa condição, diz-se que ocorreu a ruptura do elemento de fundação, ou ruptura nítida. Assim, tem-se que a capacidade de carga (R) desta estaca será o valor da carga responsável por gerar a ruptura nítida, ou seja, é a força que corresponde à máxima resistência que o sistema estaca-solo pode oferecer, ou ainda, é o equilíbrio de forças dado por:

$$R = R_L + R_P \quad (1)$$

Onde: R = Capacidade de carga;

R_L = Força de atrito lateral;

R_P = Força de resistência de ponta.

Cada camada do subsolo de espessura ΔL proporciona uma tensão local de ruptura (r_L), assim:

$$R_L = U \Sigma(r_L \Delta L) \quad (2)$$

Onde: U = Perímetro do fuste (seção da estaca);

$\Sigma(r_L \Delta L)$ = Somatório do atrito lateral em cada segmento.

Quanto à resistência da ponta, temos:

$$R_P = r_P A_P \quad (3)$$

Onde: r_P = Tensão da ponta;

A_P = Área da seção transversal da ponta (ou base da estaca).

Assim, tem-se:

$$R = U \Sigma(r_L \Delta L) + r_P A_P \quad (4)$$

Os métodos semiempíricos são modelos utilizados para determinação da capacidade de carga em estacas baseados nos resultados obtidos em sondagens do tipo STP. Estes métodos resultam de modelos físicos e resultados experimentais sendo, por isso, mais confiáveis que os métodos teóricos, como observam Cintra e Aoki (2010). Os principais métodos semiempíricos brasileiros são: Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996).

Método Aoki-Velloso (1975)

Neste, as incógnitas geotécnicas r_L e r_P são obtidas através de correlações com o N_{SPT} e fatores de correção tabelados. Assim, nesse método tem-se r_L como:

$$r_L = (\alpha K N_{SPT}) / F_2 \quad (5)$$

Onde: r_L = Tensão de atrito lateral na cota;

α = Razão de atrito em função do tipo de solo (tabelado);

K = Coeficiente determinado pelo tipo de solo (tabelado);

N_{SPT} = Índice de resistência à penetração na cota;

F_2 = Fator de correção (tabelado).

Para a resistência da ponta (r_P), tem-se:

$$r_P = (K N_{SPT}) / F_1 \quad (6)$$

Onde: r_P = tensão da ponta na cota;

K = Coeficiente determinado pelo tipo de solo (tabelado);

N_{SPT} = Índice de resistência à penetração na cota;

F_1 = Fator de correção (tabelado).

Portanto, substituindo as incógnitas na equação geral, a capacidade de carga (R) será dada por:

$$R = \Sigma(\alpha K N_{SPT} \Delta L) (U / F_2) + (K N_{SPT}) (A_P / F_1) \quad (7)$$

Método Décourt-Quaresma (1978)

Este método, aperfeiçoado em 1982, baseia-se no valor médio do índice de resistência à penetração do SPT ao longo de todo o fuste, sem relevar o tipo de solo. Assim, neste, a tensão de adesão (r_L) é:

$$r_L = 10 ((N_L / 3) + 1) \quad (8)$$

Onde: r_L = Tensão de adesão ou de atrito lateral;

N_L = Valor médio dos N_{SPT} ao longo do fuste.

A tensão de ponta (r_P), por sua vez, é determinada pela equação:

$$r_P = C N_P \quad (9)$$

Onde: r_P = tensão ou capacidade de carga da ponta;

C = Coeficiente característico do solo (tabelado);

N_P = Valor médio do N_{SPT} na ponta ou base da estaca, obtido a partir de três valores: o correspondente ao nível da ponta, o imediatamente anterior e posterior.

Os autores ainda introduzem na fórmula o fator β nas parcelas de resistência lateral, e o fator α nas de ponta, ambos tabelados e relativos ao tipo de solo e fundação. Por fim, a capacidade de carga (R) é calculada por:

$$R = \beta 10 ((N_L/3) + 1) U L + \alpha C N_P A_P \quad (10)$$

Método Teixeira (1996)

Teixeira (1996) propôs uma “união” dos métodos anteriormente apresentados, de forma que o cálculo da capacidade de carga (R) é dado por:

$$R = \beta N_L U L + \alpha N_P A_P \quad (11)$$

Onde: β = Parâmetro relativo à resistência lateral em função do tipo de estaca (tabelado);

N_L = Valor médio dos N_{SPT} ao longo do fuste;

α = Parâmetro relativo à resistência de ponta em função do tipo de estaca e do tipo de solo (tabelado);

N_P = Valor médio do N_{SPT} medido no intervalo de 4 diâmetros acima da ponta da estaca e 1 diâmetro abaixo.

Método Aoki (2013)

O método proposto por Aoki (2013) utiliza a recuperação do solo no amostrador SPT, ou embuchamento do solo, para a determinação da capacidade de carga em estacas, sem haver a necessidade de reconhecimento do tipo de solo a cada metro, diferente dos métodos semiempíricos.

Elaborado com base no Princípio de Conservação de Energia de Hamilton e na Teoria da Equação de Onda que, segundo Aoki (2013), constituem a base física e matemática que pode ser aplicada para a determinação do valor da resistência à penetração do amostrador-padrão no solo sob a ação do impacto do martelo no ensaio SPT, os cálculos para a determinação da capacidade de carga desenvolvem-se a partir do equilíbrio estático entre as forças atuantes no amostrador (Figura 03).

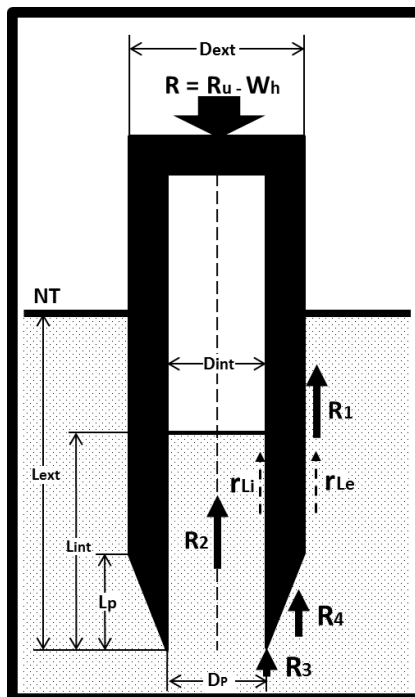


Figura 03: Equilíbrio das forças atuantes no amostrador (ADAPTADO DE AOKI, 2013).

Ressalta-se que, devido às dimensões do amostrador serem padronizadas pela norma NBR 6484:2010, os valores das seguintes dimensões são: Dext = 5,08 cm; Dint = 3,49 cm; Dp = 3,81 cm; Lp = 2,00 cm; Lext = 45 cm. A eficiência do ensaio (ef) e a relação entre o atrito interno e externo (α) devem ser determinadas para que os cálculos sejam possíveis, assim com, também, o tipo, o diâmetro e a área do fuste da estaca.

Os cálculos para determinação da capacidade de carga iniciam-se com o cálculo da resistência à penetração estática do amostrador (R_u), dada por:

$$R_u = ef \cdot 65 \cdot 75 \cdot [(30/N_{SPT} + 75)/75] \cdot N_{SPT}/30 \text{ (kgf)} \quad (12)$$

Onde: ef = Eficiência do ensaio SPT.

A seguir, determina-se os valores das expressões:

$$L = \{L_p^2 + [(D_{ext} - D_p)/2]^2\}^{0,5} \quad (13)$$

$$S_L = \pi \cdot L \cdot (D_{ext} + D_p)/2 \quad (14)$$

A razão de atrito (R_f) é calculada por:

$$R_f = D_{int}/(4 \cdot \alpha \cdot L_{int}) \quad (15)$$

Onde: L_{int} = Comprimento da recuperação do solo no amostrador (embuchamento).

O peso das hastes mais o da cabeça de bater resulta na força representada por W_h .

Assim, a tensão de atrito lateral pode ser determinada pela fórmula:

$$r_L = (R_u - W_h) / \{ \pi \cdot D_{ext} \cdot (L_{ext} - L_p) + \pi \cdot D_{int} \cdot \alpha \cdot L_{int} + (\pi/4) [(D_p - D_{int})^2/\alpha] \cdot R_f + S_L \cdot (L_p/L) \} \quad (16)$$

Obtendo-se r_L pode-se determinar:

a) o atrito interno (r_{Li}):

$$r_{Li} = \alpha \cdot r_L \quad (17)$$

b) a resistência de ponta (r_P):

$$r_P = r_L / R_f \quad (18)$$

c) a força de atrito na parede vertical externa do amostrador (R_1):

$$R_1 = \pi \cdot D_{ext} \cdot (L_{ext} - L_p) \cdot r_L \quad (19)$$

d) a força de atrito na parede vertical interna do amostrador (R_2):

$$R_2 = \pi \cdot D_{int} \cdot \alpha \cdot r_L \cdot L_{int} \quad (20)$$

e) a força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador (R_3):

$$R_3 = (\pi/4) \cdot (D_p - D_{int})^2 \cdot (r_L/R_f) \quad (21)$$

f) a componente vertical da força de atrito na superfície biselada troncônica do amostrador (R_4):

$$R_4 = [S_L \cdot (L_p/L)] \cdot r_L \quad (22)$$

Por fim, determina-se o valor da capacidade de carga (R):

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = R_u - W_h \quad (23)$$

Metodologia

Para a comparação dos três principais métodos semiempíricos empregados para a determinação da capacidade de carga com o proposto por Aoki (2013), foram utilizados os dados de sondagens realizadas no Campo Experimental da Universidade de Fortaleza (Unifor).

Cada empresa realizou três furos de sondagens, locados conforme a Figura 04. Com os resultados dos relatórios das sondagens, foram calculadas as capacidades de carga conforme cada metodologia apresentada, Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), Teixeira (1996) e Aoki (2013).

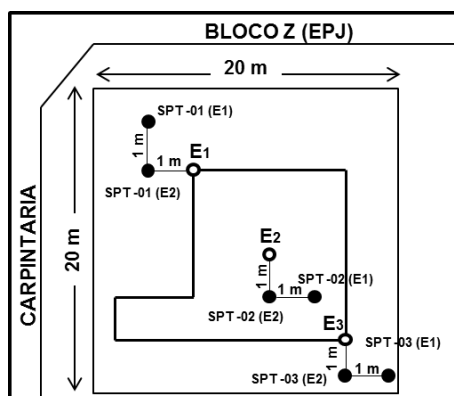


Figura 04: Localização dos pontos de sondagem no Campo Experimental da Unifor.

Resultados e Discussão

Para efeito de cálculo, foram-se abordadas estacas do tipo raiz, de diâmetro circular equivalente a 35 cm, com uma profundidade de 13 m. Os valores da eficiência do ensaio e a relação entre o atrito interno e externo (α) necessários para a metodologia de Aoki (2013), foram adotados como, respectivamente, 75%, e 3. A Tabela 01 apresenta os resultados finais dos cálculos realizados para a obtenção da capacidade de carga (R), por método e por sondagem.

MÉTODO	E1			E2		
	SPT-01	SPT-02	SPT-03	SPT-01	SPT-02	SPT-03
AV	114,12	79,21	110,47	66,86	111,04	99,01
DQ	181,19	152,97	181,45	156,68	178,88	164,78
T	104,56	91,65	108,49	92,77	102,13	99,01
MSE	133,29	107,94	133,47	105,44	130,68	120,93
A	137,00	105,6	105,0	90,10	136,5	155,90

Tabela 01: Valores das Capacidades de Carga (tf) obtidos. AV (Aoki-Velloso, 1975), DQ (Décourt-Quaresma, 1978), T (Teixeira, 1996), MSE (Média dos três métodos semiempíricos) e A (Aoki, 2013).

Conclusão

Observa-se que o método de Aoki (2013), para o caso estudado, apresentou resultados próximos aos valores encontrados nos métodos tradicionais, Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996), apesar do mesmo ter se mostrado menos conservador. A situação encontrada também foi observada por Moreira (2014), que comprovou a partir de suas análises que para solos finos, os valores do método proposto por Aoki (2013) encontravam-se na faixa de 35 a 80% superiores aos referidos métodos.

Recomenda-se que para pesquisas futuras sejam realizados cálculos para a determinação da eficiência do ensaio SPT.

Referências

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6122, **Projeto e Execução de Fundações**, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6484, **Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**, 2001.

CINTRA, J. C., AOKI, N., ALBIERO, J. H., **Fundações por estacas - Projeto Geotécnico**, São Paulo-SP, Editora Oficina de Textos, 2010.

CINTRA, J. C., AOKI, N., ALBIERO, J. H., **Fundações – Ensaios estáticos e dinâmicos**, São Paulo-SP, Editora Oficina de Textos, 2013.

REBELLO, Y. C. P., **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**, São Paulo-SP, Editora Ziguarte, 2008.

MILITITSKY, J., CONSOLI, N. C., SCHNAID, F., **Patologia das fundações**, São Paulo-SP, Editora Oficina de Textos, 2008.

Agradecimentos

Agradece-se ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa do autor¹.