

# DETERMINAÇÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS CONSIDERANDO A RESISTÊNCIA POR ATRITO LATERAL NO AMOSTRADOR SPT

<sup>1,2</sup>MARCOS FÁBIO PORTO DE AGUIAR,  
<sup>2</sup>JOÃO PAULO RAMALHO MOREIRA, <sup>2</sup>FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

<sup>2</sup>Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

<marcosporto@ifce.edu.br>, <jpramalh@yaho.com.br>, <heberoliveiracivil@hotmail.com>

**Resumo.** O presente trabalho trata de um novo método de determinação de capacidade de carga de estacas proposto por Aoki (2013), com a finalidade de análise e verificação de viabilidade, quando comparado a três dos vários métodos semi-empíricos tradicionais de determinação de capacidade de carga, que são: Aoki e Velloso (1975), Decourt. e Quaresma (1978) e Teixeira (1996). No total, foram analisadas dez sondagens através de ensaio SPT com medidas de recuperação do solo no amostrador-padrão. Os ensaios apresentaram profundidades variando entre 10 e 25 metros, com características arenosas em três sondagens e siltosas nas outras sete. Para cada sondagem foram calculadas as capacidades de carga, aplicando, individualmente, cada um dos quatro métodos de determinação de capacidade de carga tratados. Os resultados mostraram que o método de Aoki (2013) apresentou valores de capacidade de carga compatíveis com os demais métodos normalmente empregados no Brasil. Ao adotar-se a mesma capacidade de carga necessária para todos os métodos, verificou-se que, para estratos compostos de solo granular, os comprimentos de estacas necessários foram maiores considerando o método de Aoki (2013) que nos demais métodos, já nas camadas com predominância dos solos finos, o método de Aoki (2013) mostrou-se menos conservador.

**Palavras-chaves:** Capacidade de carga em estacas. Métodos semi-empíricos. Solos arenosos. Solos siltosos.

**Abstract.** This paper deals with a new method for determining the bearing capacity of piles. The method was proposed by Aoki (2013) with the purpose of analysis and viability verification when compared to others three traditional semi-empirical methods, which were: Aoki e Velloso (1975), Decourt. e Quaresma (1978) and Teixeira (1996). A total of ten surveys were analyzed by SPT test with measurements of soil recovery in standard sampler. The tests showed depths ranging between 10 and 25 meters, with sandy and silty features. For each survey were calculated the bearing capacities with each of four methods. The results showed that the method of Aoki (2013) presented values of bearing capacity compatible with other methods commonly used in Brazil. By adopting the same bearing capacity required for all methods, it was found that for granular soil layers, the required pile lengths were higher considering the method of Aoki (2013) than using the other methods. For fine soil layers, the method of Aoki (2013) proved to be less conservative than the others.

**Keywords:** Bearing capacity of piles. Semi-empirical methods. Sandy soils. Silty soils.

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 70 que alguns autores brasileiros vêm estudando métodos de determinação de capacidade de carga em fundações por estacas, conhecidos como métodos semi-empíricos. Durante esse período alguns desses métodos acabaram por se destacar mais em escri-

tórios especializados em solos e fundações, entre eles, destacam-se três dos mais utilizados: Aoki e Velloso (1975), Decourt. e Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Aoki (2013) propôs um novo método, que também utiliza resultados de ensaios à percussão, porém com uma inovação no processo de execução da sondagem SPT,

que é a medição da recuperação de solo no amostrador ou embuchamento.

O presente trabalho tem por objetivo verificar e analisar as diferenças entre os métodos semi-empíricos tradicionais de determinação de capacidade de carga, no que se refere ao cálculo desses valores, e o método proposto por Aoki (2013), que considera o atrito lateral no amostrador SPT.

O trabalho foi realizado partindo de resultados de ensaios à percussão com medição da recuperação no amostrador em 4 locais no Município de Fortaleza no Estado do Ceará. Considerando um total de 10 sondagens uma estaca hipotética do tipo raiz de 300 mm de diâmetro foram obtidos e comparados os valores de capacidade de carga nos Locais 1, 2, 3 e 4 de acordo com os resultados obtidos com o Aoki (2013) e os métodos de Aoki e Velloso (1975), Decourt. e Quaresma (1978) e Teixeira (1996).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A capacidade de carga em estacas calculada por métodos semi-empíricos é, resumidamente, o somatório da contribuição de resistência por atrito lateral no fuste de uma estaca com a resistência de ponta, onde a primeira aumenta com a profundidade, pois é o somatório da contribuição por metro de profundidade e a segunda pode variar para mais ou para menos dependendo do tipo de solo em cada profundidade. Os valores são calculados em função do índice de resistência à penetração do ensaio à percussão (NSPT).

Neste item serão apresentados, primeiramente, os métodos semi-empíricos de determinação de capacidade de carga, com suas fórmulas e parâmetros considerados e, finalmente, será apresentado o método desenvolvido por Aoki (2013) e proposto neste artigo, o qual considera a resistência por atrito lateral no amostrador SPT, através da recuperação de solo neste.

### 2.1 MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS DE DETERMINAÇÃO DE CAPACIDADE DE CARGA

Considerando a predominância, no Brasil, da utilização do ensaio SPT nos estudos geotécnicos do subsolo para projetos de fundação, difundiu-se a prática relacionar medidas de NSPT diretamente com a capacidade de carga de estacas por meio de métodos semi-empíricos. Apesar de os métodos, normalmente adotados, serem ferramentas valiosas à engenharia de fundações, é importante reconhecer que, devido à natureza estatística, a validade está limitada à prática construtiva regional e às condições específicas dos casos históricos utilizados em seu estabelecimento (SCHNAID, 2000).

Cintra e Aoki (2010), observam que, há um descrédito quanto aos métodos teóricos devido à discrepância acentuada ao utilizarem-se as fórmulas teóricas nos cálculos de capacidade de carga de estacas, sendo preteridos em prol dos métodos semi-empíricos.

São apresentados, na sequência, três dos diversos métodos semi-empíricos de previsão de capacidade de carga existentes, os quais são os mais utilizados nas empresas especializadas na área de fundações e Geotecnia, em funcionamento no país.

A fórmula geral utilizada para determinar a capacidade de carga para os métodos a serem apresentados é basicamente a seguinte:

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

Onde  $R_L$  = resistência lateral;  $R_p$  = resistência de ponta.

#### 2.1.1 Aoki e Velloso (1975)

Após estudo comparativo entre o ensaio SPT e alguns resultados de prova de carga em estacas, desenvolveu-se o método de Aoki e Velloso (1975), que resulta a equação, em que a primeira parcela refere-se à resistência de ponta e a segunda à resistência lateral:

$$R = \frac{kN_{spt}}{F_1} A_p + \frac{U}{F_2} \sum_1^n (\alpha k N_{spt} \Delta L) \quad (2)$$

Onde:  $k$ : coeficiente de correlação entre CPT e SPT;  $N_{SPT}$ : índice de resistência à penetração;  $A_p$ : área da seção transversal da estaca;  $U$ : perímetro da seção transversal da estaca;  $\Delta L$ : comprimento do fuste da estaca relativo à camada a ser calculada;  $\alpha$ : razão de atrito;  $F_1$ : fator de correção da resistência de ponta;  $F_2$ : fator de correção da resistência lateral.

Pelo fato de a metodologia apresentada, que utiliza os valores de SPT, ter sido elaborada, inicialmente, em relação aos resultados de ensaios estáticos de cone (CPT), faz-se necessário, para aplicá-la nos ensaios de penetração dinâmica, adotar o coeficiente  $k$  e a razão de atrito  $\alpha$ , que dependem do tipo de solo, e os coeficientes  $F_1$  e  $F_2$ , que dependem do tipo de estaca, sendo fatores de correção das resistências de ponta e lateral, respectivamente, os quais levam em consideração as diferenças de comportamentos entre a estaca e o cone estático.

#### 2.1.2 Decourt. e Quaresma (1978)

No método semi-empírico de determinação de capacidade de carga proposto com Decourt. e Quaresma

(1978), as parcelas relativas às contribuições de resistência lateral e de ponta, respectivamente,  $R_L$  e  $R_p$ , são definidas pelas seguintes equações:

$$R_L = r_L UL \quad (3)$$

Onde:  $r_L$ : tensão de adesão ou de atrito lateral unitário;  $U$ : perímetro da seção transversal da estaca;  $L$ : comprimento do fuste da estaca relativo à camada a ser calculada.

$$R_p = r_p A_p \quad (4)$$

Onde:  $r_p$ : capacidade de carga unitária da ponta ou base da estaca;  $A_p$ : área da seção transversal da estaca.

Na versão inicial, o atrito lateral unitário ( $r_L$ ) é obtido a partir do valor médio do índice de resistência à penetração do SPT ao longo do comprimento da estaca, sem considerar os valores de utilizados no cálculo da resistência de ponta ( $r_p$ ) e sem diferenciar os tipos de solo.

A resistência de ponta ( $r_p$ ), ainda na versão inicial, é estimada pela equação:

$$r_p = CN_p \quad (5)$$

Onde:  $N_p$ : valor médio do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) na ponta, obtido a partir de três valores: correspondente à ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior;  $C$ : coeficiente característico do solo, ajustado por meio de 41 provas de carga realizadas em estacas pré-moldadas de concreto.

Já na segunda versão (DECOURT, 1982; DECOURT; QUARESMA, 1982), o método foi aperfeiçoado no que se refere à resistência lateral, transformando os valores tabelados e estendendo o limite superior de  $N_{SPT}$ , que antes era  $N_L = 15$  para  $N_L = 50$ , para estacas de deslocamento e estacas escavadas com bentonita, mantendo  $N_L = 15$  para estacas Strauss e tubulões a céu aberto, na seguinte equação:

$$r_L = \frac{N_L}{3} + 1(tf/m^2) \quad (6)$$

Onde:  $N_L$  média dos valores de  $N_{SPT}$ , porém quando a média for menor que 3, considera-se 3 e quando for maior que 50 considera-se 50.

Decourt (1996) introduziu os fatores  $\alpha$  e  $\beta$ , nas parcelas de resistência de ponta e lateral, respectivamente, originando a seguinte equação, com dois fatores a mais, de capacidade de carga:

$$R = \alpha CN_p A_p + \beta \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) UL \quad (7)$$

Onde:  $\alpha$ : fator em função do tipo de estaca e do tipo de solo; e  $\beta$ : fator em função do tipo de estaca e do tipo de solo.

### 2.1.3 Teixeira (1996)

Teixeira (1996) propõe uma equação unificada para o cálculo da capacidade de carga de estacas, em função de dois parâmetros,  $\alpha$  e  $\beta$ , onde o primeiro depende do tipo de estaca e do tipo de solo e o segundo apenas do tipo de estaca. A equação em questão é a seguinte:

$$R = R_p + R_L = \alpha N_p A_p + \beta N_L UL \quad (8)$$

$N_p$ : valor médio do  $N_{SPT}$  no intervalo de quatro diâmetros acima da ponta da estaca e um diâmetro abaixo;  $N_L$ : valor médio do  $N_{SPT}$  ao longo do fuste da estaca.

Vale ressaltar que o método de Teixeira (1996) não se aplica ao cálculo do atrito lateral de estacas pré-moldadas de concreto flutuantes em espessas camadas de argilas moles sensíveis, com  $N_{SPT}$  inferior a três. No caso, a parcela unitária de atrito lateral ( $r_L$ ), em função da natureza do sedimento argiloso, é obtida de acordo com valores específicos recomendado pelo autor.

## 2.2 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE CAPACIDADE A PARTIR DA RECUPERAÇÃO DE SOLO NO AMOSTRADOR SPT

A seguir será apresentado o método desenvolvido por Aoki (2013), o qual leva em conta a medida da recuperação de amostra de solo no amostrador padrão SPT e sua utilização prática na determinação de capacidade de carga.

Segundo Aoki (2013), constituem a base física e matemática do método proposto, o Princípio da Conservação de Energia de Hamilton e a Teoria da Equação da Onda.

### 2.2.1 PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA HAMILTON

O princípio de Hamilton refere-se à conservação de energia em um determinado intervalo de tempo de um evento dinâmico. No caso em estudo, o princípio se aplica na conservação de energia quando ocorre a queda do peso de 65 kgf de uma altura de 75 cm no ensaio SPT.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc})dt = 0 \quad (9)$$

Na equação variacional da expressão 9,  $\delta$  representa a variação entre as energias cinética ( $T$ ) e potencial ( $V$ )

do sistema em um intervalo de tempo  $(t_2 - T_1)$ , enquanto  $W_{nc}$  é o trabalho efetuado por forças não conservativas no mesmo intervalo de tempo (CLOUGH; PENZIEN, 1975).

### 2.2.2 TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA APLICADA AO ENSAIO SPT

No ensaio SPT, os impactos verticais, oriundos do peso de 65 kgf caindo de uma altura constante sobre a cabeça de bater, podem ser interpretados pela teoria da equação da onda (SMITH, 1960) de modo análogo ao caso de análise de comportamento de estacas cravadas submetidas a condições de carregamento dinâmico.

Em resumo, a equação da onda que define um deslocamento  $w$  da seção transversal  $z$  ao longo de um tempo  $t$  é:

$$c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{sU}{\rho A} \quad (10)$$

Onde:  $w$ : deslocamento da seção;  $t$ : tempo;  $z$ : abscissa da seção;  $s$ : reação lateral local;  $\rho$ : deslocamento da seção;  $c$ : velocidade de propagação  $= (E/\rho)^{0,5}$ ;  $A$ : área;  $U$ : perímetro.

E a solução geral da equação é a seguinte:

$$w(z, t) = g(z + ct) + f(z - ct) = W_d \downarrow + W_u \uparrow \quad (11)$$

Onde:  $w(z, t)$ : deslocamento da seção  $z$  no instante  $t$ .

Segundo Aoki (2013), as duas funções componentes,  $g$  e  $f$ , são denominadas onda descendente  $W_d$  (*wavedown*) e onda ascendente  $W_u$  (*waveup*), e se deslocam para baixo e para cima a uma velocidade  $c$ .

Por fim, a resistência dinâmica que é oferecida pelo solo, tanto pelo atrito lateral, como pela ponta, acaba sendo proporcional à velocidade da partícula em na seção  $z$  em um instante  $t$ , ao longo de todo o fuste da estaca. Sendo assim, a resistência dinâmica é dada por:

$$R_d(z, t) = J_s v R_u(z, t) \quad (12)$$

$$R_t(z, t) = R_u(z, t) + R_d(z, t) \quad (13)$$

$$R_t(z, t) = R_u(z, t)[1 + J_s v(z, t)] \quad (14)$$

Onde:  $J_s$ : coeficiente de amortecimento de Smith;  $v(z, t)$ : velocidade de partícula.

### 2.2.3 RESISTÊNCIA POR ATRITO LATERAL NO AMOSTRADOR SPT

Inicialmente, deve-se determinar a eficiência do ensaio SPT com base na execução da prova de carga estática do sistema (cabeça de bater + hastes + cilindro vazado do amostrador) realizada logo após a medida do valor  $N_{spt}$  (NEVES, 2004 apud CINTRA et. al., 2013):

$$e_f = \frac{R_u 30cm}{WHN_{spt}} \quad (15)$$

Onde:  $R_u$ : resistência à penetração estática do amostrador;  $W$ : peso do martelo utilizado no ensaio SPT (em torno de 65 kgf);  $H$ : altura de queda do martelo no ensaio SPT (aproximadamente 75 cm).

A Figura 1 apresenta um resultado de prova de carga estática, realizada no amostrador-padrão SPT, com obtenção da eficiência ( $\eta$ ), que, no caso equivale a 0,75 Aoki (2014).

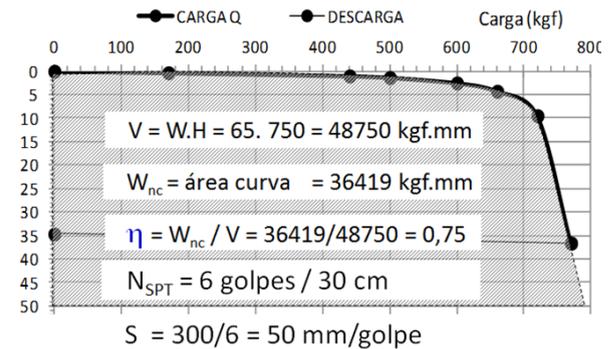
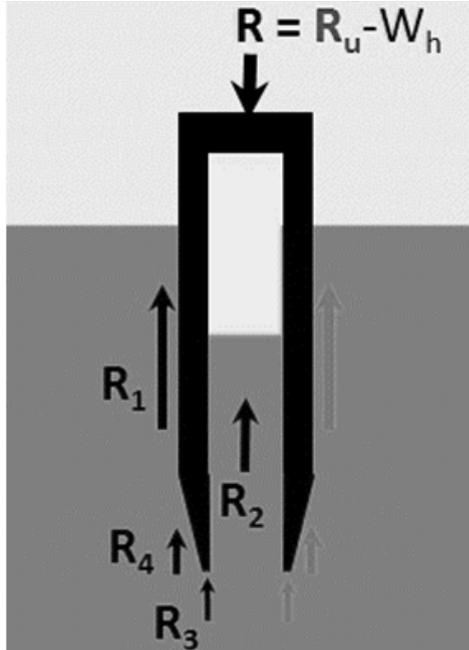


Figura 1: Cálculo de Eficiência através Prova de Carga Estática. Fonte: Aoki (2014).

A Figura 2 mostra o equilíbrio das forças não conservativas que atuam no amostrador durante o impacto imposto pelo martelo de peso  $W$ , após cair de uma altura  $H$ , de acordo com o procedimento de execução do ensaio à percussão tipo SPT (ABNT, 2001).

Segundo Aoki (2013), as respectivas forças de atrito resultantes são:  $R_1$ : força de atrito na parede vertical externa do amostrador;  $R_2$ : força de atrito na parede vertical interna do amostrador;  $R_3$ : força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador;  $R_4$ : componente vertical da força de atrito ao longo da superfície biselada troncônica do amostrador.

Já que o amostrador utilizado nos ensaios SPT é padrão, suas medidas também são, e, como são necessárias para o cálculo das forças resultantes descritas, apresentam os seguintes valores:  $D_{ext} = 5,08$  cm;  $D_{int} = 3,49$  cm;  $D_p = 3,81$  cm;  $L_{ext} = 45$  cm e  $L_p = 2,00$  cm.



**Figura 2:** Equilíbrio das Forças atuantes no amostrador. Fonte: Aoki (2014).

Onde:  $D_{ext}$ : diâmetro externo do amostrador;  $D_{int}$ : diâmetro interno do amostrador;  $D_p$ : diâmetro externo da ponta do amostrador;  $L_{ext}$ : comprimento referente à espessura da camada ensaiada no SPT;  $L_p$ : comprimento da ponta chanfrada do amostrador.

Considerando o equilíbrio estático de todas as forças que atuam no amostrador, tem-se:

$$R_u - W_h = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (16)$$

Onde:  $R_u$ : força não conservativa resistente à penetração estática do amostrador;  $W_h$ : peso das hastes e cabeça de bater utilizados no ensaio SPT.

As expressões, que mostram o cálculo das forças resistentes, são apresentadas a seguir:

$$R_1 = \pi D_{ext}(L_{ext} - L_p)r_L \quad (17)$$

A Figura 3 mostra graficamente o efeito da força, que se desenvolve ao longo da parede interna do amostrador e o equilíbrio das forças que atuam na ponta aberta do amostrador. A força pode ser calculada de duas maneiras: pela reação na ponta aberta ( ) ou pela reação lateral interna (atrito interno) que considera o embuchamento, o qual se refere ao comprimento, que é a amostra de solo recuperada após a cravação do amostrador ao longo dos 45 cm para cada metro de profundidade conforme ABNT (2001). Dito isso, tem-se que a força corresponde a:

$$R_2 = \pi D_{int}r_{Li}L_{int} \quad (18)$$

Porém, pode-se considerar que o atrito interno é a vezes maior que o atrito externo:

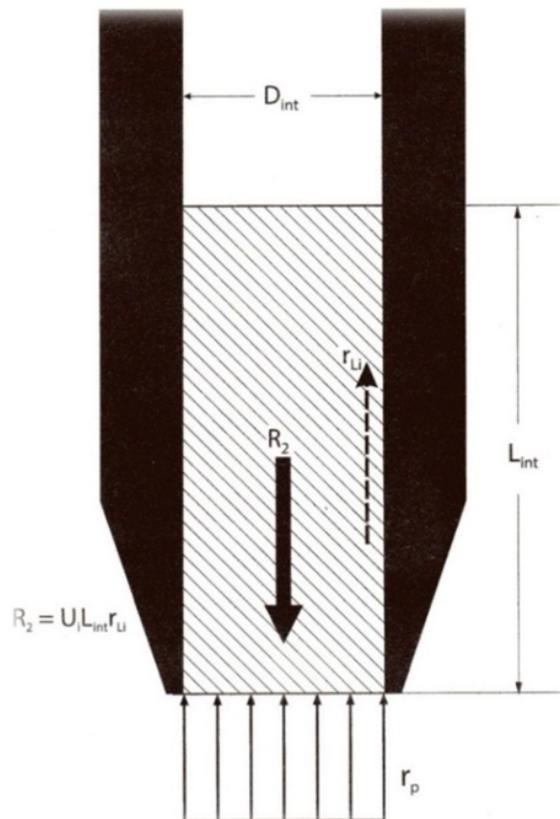
$$\alpha = \frac{r_{Li}}{r_{Le}} \quad (19)$$

Resultando outra possível equação:

$$R_2 = \pi D_{int}\alpha r_{Le}L_{int} \quad (20)$$

Quando se considera o equilíbrio das forças atuantes na ponta do amostrador, a outra possível equação que determina  $R_2$  é igual à resultante da resistência na ponta aberta do amostrador padrão SPT, sendo escrita da seguinte maneira:

$$R_2 = \frac{\pi D_{int}^2}{4}r_p \quad (21)$$



**Figura 3:** Equilíbrio das forças atuantes na ponta aberta do amostrador. Fonte: Aoki (2013).

Por semelhança com o ensaio de cone CPT (LUNNE; ROBERTSON; POWELL, 1997), pode ser definida a razão de atrito  $R_f$ , a qual relaciona atrito lateral externo e resistência de ponta e que é um valor adimensional representado por:

$$R_f = \frac{r_{Le}}{r_p} \quad (22)$$

Igualando as equações 20 e 21 pode-se obter outra expressão para a tradicional relação de atrito  $R_f$ , a qual será utilizada para cálculo da resistência lateral externa unitária no método proposto por Aoki (2013), a ser apresentada na sequência:

$$R_f = \frac{D_{int}}{4\alpha L_{int}} \quad (23)$$

As forças  $R_3$  e  $R_4$  podem ser obtidas pelas expressões:

$$R_3 = \frac{\pi}{4}(D_p^2 - D_{int}^2)\left(\frac{r_L}{R_f}\right) \quad (24)$$

$$R_4 = (S_L \frac{L_p}{L})r_L \quad (25)$$

Onde os valores de  $L$  (comprimento da parte chanfrada na ponta do amostrador) e  $S_L$  (área da parte chanfrada, também relativa a ponta do amostrador) são obtidos como segue:

$$L = \sqrt{L_p^2 + \left[\frac{(D_{ext} - D_p)}{2}\right]^2} \quad (26)$$

$$S_L = \pi L \frac{(D_{ext} - D_p)}{2} \quad (27)$$

Partindo do exposto, a resistência lateral externa unitária pode ser obtida por meio da expressão que segue:

$$r_L = \frac{R_u - W_h}{\pi D_{ext}(L_{ext} - L_p) + \pi D_{int}\alpha L_{int} + \frac{\pi}{4} \frac{D_p^2 - D_{int}^2}{R_f} + S_L \frac{L_p}{L}} \quad (28)$$

Logo, a resistência de ponta, pode ser obtida por uma simples equação:

$$r_p = \frac{r_L}{R_f} \quad (29)$$

Pode-se notar que, diferente dos outros métodos, não se faz necessário o conhecimento do tipo de solo para que possa ser determinada a resistência a penetração do solo no amostrador (AOKI, 2013).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de comparar os métodos de determinação de capacidade de carga, foram obtidos dados de sondagens SPT, com medição do embuchamento, realizadas em alguns locais das cidades de Fortaleza e Eusébio localizadas no estado do Ceará, a serem apresentados a seguir.

Foram realizadas, no total, 10 sondagens, em quatro endereços diferentes, situados nos seguintes locais: Local 1, Papicu, Fortaleza/CE (BERATER, 2013); Local 2, Eusébio/CE (BERATER, 2014c); Local 3, Quintino Cunha, Fortaleza/CE (BERATER, 2014b); Local 4, Universidade de Fortaleza, Fortaleza/CE (BERATER, 2014a).

A Tabela 1 apresenta todas as 10 sondagens que foram executadas e os respectivos locais, as nomenclaturas a serem adotadas e as profundidades máximas atingidas pela sondagem à percussão.

Em resumo, as sondagens do Local 1 apresentaram solo composto de areia siltosa entre 1 m e 13 m, entre 15 m e 18 m e entre 21 m e 24 m de profundidade, sendo nas outras profundidades silte argiloso. Nos Locais 2 e 3 o solo é totalmente composto por solo do tipo silte argiloso. No Local 4, até 5m de profundidade, encontra-se areia siltosa, porém a partir dos 6 m o solo passa a ser silte argiloso.

**Tabela 1:** Localização, nomenclatura e profundidade máxima das Sondagens.

<b>Localização</b>	<b>Quantidade de Sondagens</b>	<b>Nomenclatura a ser utilizada</b>	<b>Profundidade máxima (m)</b>
Local 1, Papicu, Fortaleza/CE	3	CER/SP-09A	25,27
		CER/SP-11A	25,23
		CER/SP-12A	25,05
Local 2, Eusébio/CE	2	GIE/SP-01	11,05
		GIE/SP-02	10,02
Local 3, Quintino Cunha, Fortaleza/CE	2	GIQ/SP-01	13,05
		GIQ/SP-02	12,02
Local 4, Universidade de Fortaleza, Fortaleza/CE	3	CEU/SP-01	20,05
		CEU/SP-02	19,9
		CEU/SP-03	20,25

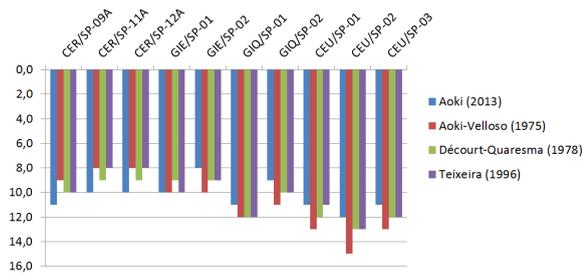
**Tabela 2:** Variações percentuais entre os métodos tradicionais e Aoki (2013)

	<b>Aoki (2013)</b>	<b>Aoki-Velloso (1975)</b>	<b>Décourt-Quaresma (1978)</b>	<b>Teixeira (1996)</b>
<b>CER/SP-09A</b>	11,0	18,18%	9,09%	9,09%
<b>CER/SP-11A</b>	10,0	27,27%	18,18%	27,27%
<b>CER/SP-12A</b>	10,0	27,27%	18,18%	27,27%
<b>GIE/SP-01</b>	10,0	9,09%	18,18%	9,09%
<b>GIE/SP-02</b>	8,0	9,09%	18,18%	18,18%
<b>GIQ/SP-01</b>	11,0	9,09%	9,09%	9,09%
<b>GIQ/SP-02</b>	9,0	0,00%	9,09%	9,09%
<b>CEU/SP-01</b>	11,0	18,18%	9,09%	0,00%
<b>CEU/SP-02</b>	12,0	36,36%	18,18%	18,18%
<b>CEU/SP-03</b>	11,0	18,18%	9,09%	9,09%

Para critérios de cálculo de capacidade de carga e posterior comparação foi adotada estaca do tipo Raiz com diâmetro de 30 cm e área da seção do fuste de 707 cm<sup>2</sup>. Para o método de determinação de capacidade de carga proposto no presente trabalho, a razão de atrito adotada, considerou o valor utilizado no exemplo proposto por Aoki (2013). Por fim, a eficiência ( $\eta$ ) utilizada nos cálculos seguiu o exemplo apresentado na seção anterior.

### 3.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Adotando-se uma capacidade de carga última de 70 tf, elaborou-se o gráfico da Figura 4 com o intuito de comparar os resultados de comprimentos necessários, nas condições das sondagens realizadas, entre os quatro métodos de determinação de capacidade de carga estudados: Aoki e Velloso (1975), Decourt. e Quaresma (1978), Teixeira (1996) e Aoki (2013).



**Figura 4:** Comprimento de estaca necessário para atender a carga de ruptura de 70 kgf.

Partindo dos resultados encontrados, pode-se observar que as sondagens CER/SP-09A, CER/SP-11A e CER/SP-12A apresentaram comprimentos menores para os métodos tradicionais quando comparados ao método de Aoki (2013). Já em relação às outras sete sondagens, os comprimentos foram em sua maioria superiores em relação a Aoki (2013).

A Tabela 2 mostra as variações de valores de capacidade de carga calculados por métodos tradicionais em relação ao método proposto por Aoki (2013).

Considerando o exposto, pode-se dizer que as variações foram maiores nos solos predominantemente arenosos, do que nos solos em que foi encontrada predominância de finos (silte).

Observado isso, entende-se que no caso do método proposto, os valores e coeficientes utilizados no cálculo da capacidade de carga são baseados na recuperação da amostra de solo no amostrador SPT, e não no tipo de solo presente no local da sondagem e no tipo de estaca utilizada, como é feito nos métodos tradicionais. Na

maioria das vezes os parâmetros utilizados nos métodos tradicionais acabam sendo inferiores aos encontrados no método proposto, no caso de solos predominantemente compostos por materiais finos.

Além do tipo de solo, há também um fator que é fundamental para aplicação do método proposto, que é a eficiência, definindo os principais valores utilizados nos cálculos. Pelo fato de a eficiência ter sido estimada em 75%, conforme Aoki (2014), e por não ter sido possível a realização de prova de carga para cálculo da eficiência, existe a possibilidade de influência nos resultados.

Observando-se os comprimentos de estaca encontrados, para uma capacidade de carga de 70 tf, entende-se que o método proposto por Aoki (2013), considerando a restrições abordadas, acaba sendo menos conservador que os demais para estratos compostos de solos predominantemente finos, pois sugere comprimento de estacas, no geral, menores para a mesma capacidade de carga. No caso de camadas compostas por solos granulares, o método de Aoki (2013) mostrou-se mais conservador.

### 4 CONCLUSÕES

Foi possível observar, no trabalho, que o método de cálculo de capacidade de carga em estacas considerando a recuperação no amostrador (embuchamento), proposto por Aoki (2013) apresentou resultados compatíveis com os métodos de Aoki e Velloso (1975), Decourt. e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), normalmente empregados no Brasil.

Ao considerar a carga de ruptura de 70 tf, observou-se que o método de Aoki (2013) pode ser analisado como um método menos conservador para solos finos (siltosos), pois apresentou menores comprimentos para as estacas ao compara-lo com os demais métodos considerados. Para o caso de solos granulares (predominantemente arenosos) a utilização do método de Aoki (2013), para determinação de capacidade de carga de estacas, resultou em comprimentos de estaca necessários maiores que com o emprego dos outros métodos. Os resultados obtidos com o método de Decourt. e Quaresma (1978) foi o que apresentou menor variação média em relação ao método de Aoki (2013), considerando todas as situações propostas.

Pressupõe-se que a diferença verificada nos resultados, para diferentes tipos de solos, se dá devido à elevada coesão apresenta por alguns solos finos, que, no método proposto, pode ser identificada através da resistência lateral do ensaio SPT, a partir da amostra de solo recuperada no amostrador. Essa coesão acaba por resultar em maior resistência lateral, fazendo com que

os valores obtidos pelo método de Aoki (2013) sejam maiores que nos métodos tradicionais, para solos finos.

## REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: solo - sondagens de simples reconhecimento com SPT - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

AOKI, N. *Prática de fundações em estacas pré-moldadas em terra*. 1985. Palestra proferida no curso Pile Foundations for Offshore Structures. Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ.

\_\_\_\_\_. Inovação no spt. In: CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; TSUHA, C. de H. C.; GIACHETI, H. L. (Ed.). *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos*. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

\_\_\_\_\_. *Inovação no SPT, interpretação medida recuperação solo no amostrador e utilização prática*. Palestra proferida no Núcleo Regional São Paulo. São Paulo: ABMS, 2014.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: *Proceedings of PANAMERICAN CSMFE*. Buenos Aires: [s.n.], 1975. v. 1, p. 367 – 376.

BENEGAS, H. Q. *Previsões para a curva carga-recalque de estacas a partir do SPT*. Dissertação (mestrado) — COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.

BERATER. *Relatório de Sondagem Condomínio Enseada Reserva*. Papicu, Fortaleza, 2013.

\_\_\_\_\_. *Relatório de Sondagem Campo Experimental UNIFOR, Edson Queiroz*. Fortaleza, 2014.

\_\_\_\_\_. *Relatório de Sondagem Rua Padre Manoel Primo*. Fortaleza, 2014.

\_\_\_\_\_. *Relatório de Sondagem Rua Raul Tavares Cavalcante*. Eusébio, 2014.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 96p.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; TSUHA, C. de H. C.; GIACHETI, H. L. *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 144p.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. *Dynamics of structures*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1975. 738p.

COSTA, F. V. *Estacas para fundações*. São Paulo: Livraria Luso-Espanhola e Brasileira, 1956.

DECOURT, L. Prediction of the bearing capacity of piles based exclusively on n values of the spt. In: *Proceedings of European Symposium on Penetration Testing*. Amsterdam: [s.n.], 1982.

\_\_\_\_\_. A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: *Anais do SEFE, Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e GEOTECNIA*. São Paulo: [s.n.], 1996. v. 1, n. 3, p. 215 – 224.

DECOURT, L.; QUARESMA, A. R. *Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga limite de uma estaca*. São Paulo: A construção, 1982.

DECOURT, L.; QUARESMA, R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de spt. In: *Anais do CBMSEF*. Rio de Janeiro: [s.n.], 1978. v. 1, p. 45 – 53.

LAPROVITERA, H. *Reavaliação de método semi-empírico de previsão de capacidade de carga de estacas a partir de Banco de dados*. Dissertação (Mestrado) — COOPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1988.

LUKIANCHUKI, J. A. *Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. [S.l.]: Blackie Academic and Professional, 1997. 312 p.

MONTEIRO, P. F. *Capacidade de carga de estacas - Método Aoki-Velloso*. [S.l.], 1997.

NEVES, L. F. S. *Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. 90 f.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

SCHNAID, F. *Ensaio de campo e suas aplicações na engenharia de fundações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 189 p.

TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. In: *Anais do SEFE*. São Paulo: [s.n.], 1996. v. 1.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: HACHICH (Ed.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. [S.l.]: Pini, 1998.

TOMLINSON, M. J. *Pile design and construction practice*. 4. ed. London: E. and F.N. Spon, 1994.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações: fundações profundas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VESIC, A. S. *Design of pile foundations. Synthesis of Highway Practice 42*. Washington: Transportation Research Board, National Research Council, 1977.