

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Renato Silva Nicoletti. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Renato_nicoletti@hotmail.com

Djalma Carlos Abritta de Oliveira – Centro Universitário Palista - UNICEP

djalmabritta@hotmail.com

Vinícius Ranieri Teixeira – Centro Universitário Paulista - UNICEP

Vini_txr@hotmail.com

RESUMO

O dimensionamento de um sistema de fundações profundas deve o tipo de solo e sua resistência, o perfil estratigráfico do terreno, e a seleção adequada do tipo de estaca. Para a caracterização do solo, a principal forma é a sondagem *standart penetration test* (SPT), ensaio este que permite caracterizar, e chegar no valor resistido a penetração em cada camada. A literatura apresenta formas variadas de determinar a capacidade de carga geotécnica para o solo, dentre os quais destacam-se os métodos semiempíricos, sendo os de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978) os mais utilizados no Brasil. A partir das metodologias semiempíricas obtêm-se valores de capacidade de carga, que são compostos pelas parcelas laterais e ponta de uma estaca. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa dos métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978). Para tanto, foram utilizados 20 SPTs que apresentavam solos com características distintas. Tal comparação foi realizada para estacas hélice contínuas e pré-moldada, com diâmetro de 30 cm. Os resultados do estudo demonstraram que a formulação de Décourt-Quaresma (1978), para os dois tipos de estacas, é sensível a solos arenosos, indicando, resultados conservadores. Por sua vez, o método de Aoki-Velloso (1975) tendeu a resultar em valores majorados de capacidade de carga geotécnica para solos arenosos. Por fim, vale ressaltar que para estacas pré-moldadas, observou-se menor variação nos valores de capacidade de carga geotécnica dentre os métodos analisados.

Palavras-chave: métodos semiempíricos; estaca pré-moldada; estaca hélice contínua; fundações profundas.

Data de recebimento: 07/03/2023

Data do aceite de publicação: 22/12/2023

Data da publicação: 30/12/2023

COMPARATIVE ANALYSIS OF SEMI-EMPIRICAL METHODS FOR THE CALCULATION OF THE LOAD CAPACITY OF PILES

ABSTRACT

The dimensioning of a system of deep foundations depends on the soil type and its strength, the stratigraphic profile of the terrain, and the adequate selection of the pile type. For the characterization of the soil, the main way is the standard penetration test (SPT), a test that allows characterizing and arriving at the resisted value of penetration in each layer. The literature presents various ways of determining the geotechnical load capacity for the soil, among which the semi-empirical methods stand out, the ones by Aoki-Velloso (1975) and Décourt-Quaresma (1978) being the most used in Brazil. Based on semi-empirical methodologies, load capacity values are obtained, which are composed of the lateral portions and the tip of a pile. This paper aimed to carry out a comparative analysis of the methods of Aoki-Velloso (1975) and Décourt-Quaresma (1978). For that, 20 SPTs were used that presented soils with different characteristics. This comparison was performed for precast piles and continuous propeller piles, with a diameter of 30 cm. The results of the study demonstrated that the formulation by Décourt-Quaresma (1978), for both types of stakes, is sensitive to sandy soils, indicating conservative results. In turn, the Aoki-Velloso (1975) method tended to result in increased values of geotechnical bearing capacity for sandy soils. Finally, it is worth noting that for precast piles, there was less variation in the geotechnical load capacity values among the analyzed methods.

Keywords: semi-empirical methods; precast piles; continuous propeller pile; deep foundations.

1 INTRODUÇÃO

O sistema de fundações consiste no conjunto de elementos estruturais responsável por resistir e transmitir os esforços da edificação para o solo. No Brasil, o projeto e execução de fundações é normatizado pela NBR 6122 (ABNT, 2019). Ela classifica os elementos de fundação em rasos e profundos. Especificamente, a fundação rasa, também chamada de direta ou superficial, consiste no elemento de fundação cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. No sistema de fundação rasa, as cargas são distribuídas pela base. Como principais exemplos de fundações rasas, tem-se as sapatas e o *radier*.

Por outro lado, as fundações profundas podem transmitir cargas pela base (resistência de ponta), ou pela superfície lateral do elemento de função (resistência de fuste), ou uma combinação das duas. Tais elementos possuem sua ponta apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e, no mínimo, 3,0 m. Como exemplos de fundações profundas, vale citar as estacas e os tubulões.

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Para realizar o projeto de uma fundação, o conhecimento de duas variáveis é de fundamental importância: a magnitude das cargas que a edificação transmite para o solo; e as propriedades do próprio solo.

Nesse contexto, vale ressaltar que nenhum solo é igual ao outro. Eles são materiais heterogêneos que variam fortemente em diversos aspectos, sendo os principais o grau de compactação, a altura do nível d'água do lençol freático e a distribuição granulométrica.

Assim, é de fundamental importância conhecer o solo para projetar a fundação. Existem diversos ensaios que podem ser realizados para esse fim. O principal deles é a sondagem à percussão ou “*standart penetration test*”, conhecida popularmente como sondagem SPT.

Especificamente no caso de estacas, para realizar o dimensionamento dos componentes é preciso determinar a capacidade de carga de cada elemento, a qual é definida como a força máxima transmitida pela fundação ao solo, sem causar a ruptura tanto do elemento quanto do solo, admitindo certos critérios de segurança. Em seu item 7.3, a NBR 6122 (ABNT, 2019) estabelece que a capacidade de carga pode ser determinada pelos seguintes métodos:

- Métodos teóricos, utilizando formulações clássicas;
- Métodos empíricos, correlacionando valores de tensões com a descrição do solo;
- Métodos semiempíricos, relacionando resultados de ensaios (tais como o SPT, CPT etc.) com tensões admissíveis ou tensões resistentes de cálculo.

Os principais métodos semiempíricos para o cálculo da capacidade de carga de estacas são o de Aoki-Velloso (1975), o de Décourt-Quaresma (1978), o de Teixeira (1996) e o de Lobo (2005). Porém, para um mesmo tipo de solo, tais métodos acarretam resultados diferentes, visto que os coeficientes de cada um foram elaborados para um dado domínio de validade, ou seja, foram desenvolvidos observando características de solo, e relação deste com os diferentes tipos de estacas, e as vinculações destes elementos.

Ademais, pelo fato de existirem diversos métodos para calcular a capacidade de carga de estacas, o projetista pode ficar confuso sobre qual utilizar, e optar por um método que não atenda as características reais do solo. Ainda nesse contexto, o Brasil é um país com proporções continentais, possuindo uma grande heterogeneidade de solos. Por esse motivo, o método recomendado para a região Sul do país não é o mesmo recomendado para a região Norte, por exemplo.

No Brasil, os principais trabalhos recentes que envolvem métodos semiempíricos para o cálculo da capacidade de carga de estacas são os de Araújo (2019), Monteiro, Araújo &

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Aguiar (2017), Bernardes (2021), Labanca (2021), Silva (2018), Rodrigues *et al.* (2020), Jesus (2017).

Araujo (2019) realizou análises comparativas de métodos semiempíricos de capacidade de carga de estacas. Utilizou parâmetros estatísticos dos resultados de oito ensaios SPT, e uma prova de carga realizada com estaca do tipo raiz, no município de Fortaleza/CE. Ademais gerou distribuições de probabilidades a partir dos resultados dos ensaios e variáveis aleatórias, estimando a probabilidade de os resultados aproximarem do produto da prova de carga. Concluiu-se que os métodos de Brasfond (1991) e Vorcaro & Velloso (2000) tem maiores probabilidades de aproximar do resultado da prova de carga. E que a formulação que mais excedeu em todos os ensaios foi, o de Lizzi (1982).

Monteiro, Araújo & Aguiar (2017) estudaram capacidade de carga do sistema solo-estaca, tendo como referência os resultados de provas de carga estáticas de carregamento lento. Utilizaram duas estacas do tipo raiz, de 310 mm de diâmetro e comprimento de seis metros. O estudo ocorreu no campo experimental da Universidade de Fortaleza (UNIFOR), no município de Fortaleza/CE. O solo do local foi caracterizado em sua maioria como areia siltosa. O método adotado para análise das curvas carga x recalque para extrapolação da carga de ruptura do sistema solo-estaca foi o de Van Der Veen (1953). Os resultados foram dispostos considerando a distribuição de carga de ruptura total de ponta e lateral. Nas comparações, os métodos de Philipponnat (1980), Bustamante & Gianceselli (1982) e Cabral (1986) foram os que os resultados mais se aproximaram das cargas de ruptura alcançada na prova de carga.

Bernardes (2021) verificou a probabilidade de ruptura do sistema de fundações de métodos semiempíricos de cálculo de capacidade de carga de estacas hélice contínua. O estudo foi realizado no município de Goiânia/GO, onde, por meio de ensaios SPT foi possível determinar que o perfil do solo é composto por argila arenosa. Utilizou de abordagem probabilística Monte Carlo (Metropolis; Ulam, 1949), para comparar os valores das provas de cargas realizadas no local para cada método semiempírico proposto. Concluiu-se que entre os métodos analisados o de Décourt e Quaresma (1978) resultou em uma distribuição de probabilidade mais correspondente as provas de carga.

Labanca (2021) realizou análise comparativa dos métodos semiempíricos de capacidade de carga de estacas, e comparou as diferenças entre os resultados dos métodos semiempíricos, e a carga geotécnica média admissível, objetivando a viabilidade de execução. Para o estudo, utilizou um laudo de sondagem SPT realizado no município de Manhuaçu/MG, simulando estacas de 30 cm de diâmetro e 10 m de comprimento. Apurou que o método Aoki-Velloso

(1975) apresenta maior viabilidade de execução na região, pois os resultados apresentaram maior correspondência em capacidade de carga. E que o método com resultados mais insatisfatórios foi o de Décourt-Quaresma (1978).

Silva (2018) comparou os valores resultantes de capacidade de carga de estaca de métodos semiempíricos e prova de carga dinâmica em estacas do tipo raiz. O estudo foi realizado no município de Arujá/SP, onde, foram executadas seis estacas do tipo raiz, com 410 mm de diâmetro e comprimento de 14 m. Na avaliação, o método de Décourt (1996) apresentou valor médio mais próximo do real, enquanto Brasfond (1991) obteve o resultado mais subestimado.

Rodrigues *et al.* (2020) realizaram estudo comparativo da capacidade de carga em estacas hélice contínua por métodos semiempíricos, e comparou com teste resultado de prova de carga estática. O estudo tem como base dados de 15 estacas hélice contínua executadas na cidade de Macapá/AP, onde o perfil estratigráfico demonstrou haver uma camada inicial de Silte Arenoso, e após esta, Argila Siltosa. Após análise dos dados, concluíram que o método Alonso (1996) resultou em maior aproximação das provas de carga. E os métodos Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Antunes & Cabral (1996) apresentaram resultados conservadores.

Jesus (2017) realizou análise comparativa entre métodos semiempíricos de cálculo de capacidade de carga em estaca do tipo raiz. O estudo analisou dados de dez estacas de uma obra de infraestrutura viária no município de Guarulhos/SP. Após sondagem, o perfil geológico do solo local mostrou-se diversificado, havendo a presença de areia, areia argilosa, silte, silte argiloso e arenoso, argila, argila arenosa e siltosa. Para o desenvolvimento do estudo, as estacas passaram por prova de carga dinâmica, e os resultados foram aplicados nos métodos semiempíricos. Concluiu-se que os métodos de Aoki-Velloso (1975) e Cabral (1986) apresentaram valores mais próximo aos das provas de carga. E o método de Lizzi (1982) apontou o resultado mais conservador, obtendo resultado com menor correspondência aos das provas de carga.

De modo geral, percebe-se uma grande preocupação na literatura em determinar qual o método mais adequado para cada solo e situação. Além disso, com base nos resultados descritos pelos autores, há uma variação significativa nos resultados dependendo do método adotado.

Por esse motivo, o presente trabalho tem o objetivo de realizar uma análise comparativa, para diferentes tipos de solos, dos métodos semiempíricos de Aoki-Velloso (1975) e de Décourt-Quaresma (1978), destinados ao cálculo da capacidade de carga de estacas. Com isso,

pretende-se verificar o conservadorismo dos métodos e averiguar o comportamento dos resultados para os respectivos domínios de validade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico do presente trabalho descreve o ensaio SPT, as formulações e considerações dos métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978) e os tipos de estacas que foram estudados.

2.1. Ensaio SPT

O ensaio SPT é padronizado pela NBR 6484 (ABNT, 2021). Ele consiste na penetração, por meio de procedimentos normatizados, de um elemento tubular no solo, chamado “amostrador padrão”. Com base no número de golpes de percussão necessários para o aprofundamento do amostrador, determina-se o índice de resistência a penetração (N, também chamado de N_{SPT}).

Quanto ao procedimento de execução do ensaio, vale ressaltar que o primeiro metro de escavação deve ser realizado manualmente e o material descartado. Realiza-se então o alinhamento do amostrador do elemento de cravação, e do tubo de revestimento, que deve possuir, nos últimos 45 centímetros, marcação de três seguimentos de 15 centímetros cada. A cravação do amostrador é executado por um martelo, cujo peso é padronizado, e que pode ser controlado por força motriz ou de forma manual. O martelo é erguido a 75 centímetros da cabeça do tubo, e solto para aplicar golpe (impacto) nos elementos utilizados no ensaio.

Para cada metro de solo, resultará um valor de índice de resistência a penetração. Este equivale ao número de golpes necessários para o amostrador cravar, no solo, os dois últimos trechos de 15 centímetros, que foram marcados na haste. Com isso, os principais produtos do ensaio SPT são o índice de resistência à penetração do solo, a estratigrafia dos solos e a posição do nível d'água. Por fim, com base nesses resultados, pode-se definir o tipo de fundação e realizar o respectivo projeto.

2.2 Método de Aoki-Velloso (1975)

O método de Aoki-Velloso (1975) foi apresentado no 5º Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações realizado em Buenos Aires, 1975. Para a

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

estimava da capacidade resistente de estacas, correlacionaram os resultados dos ensaios de (CPT) penetração estática e (SPT) dinâmicos.

Para determinar a capacidade de carga é necessário calcular e a resistência de ponta e resistência lateral (fuste) do elemento de fundação. Deve-se ainda observar que a estaca pode passar por (n) camadas do solo, e estas podem apresentar perfil estratigráfico diferentes, fator esse que influencia os valores de resistência de fuste.

A soma da resistência de ponta (Q_p) e resistência lateral (Q_s), resulta na carga de ruptura (Q_u) da estaca. As Equações (01), (02) e (03) apresentam as formulações para cálculo de Q_p , Q_s e Q_u , respectivamente.

$$Q_p = q_p \times A_p \quad (01)$$

$$Q_s = U \sum_l^n q_l \times \Delta L \quad (02)$$

$$Q_u = Q_p \times Q_s \quad (03)$$

Em que: Q_u é a carga de ruptura da estaca; Q_p é a parcela da resistência de ponta (kN); Q_s é a parcela da resistência lateral (kN); q_p é a resistência de ponta da estaca (kN/m²); A_p é a área da ponta da estaca (m²); U é o perímetro da estaca (m); q_l é a tensão média de atrito lateral na ruptura na camada de espessura (kN/m²); e ΔL é o comprimento do segmento de estaca analisado (m).

Nesse contexto, as Equações (04) e (05) devem ser utilizadas para o cálculo da resistência de ponta da estaca e da tensão média de atrito lateral na ruptura na camada de espessura, respectivamente.

$$q_p = \frac{q_c}{F_1} \quad (04)$$

$$q_l = \frac{f_c}{F_2} \quad (05)$$

Em que: q_c é a resistência de ponta do cone no CPT; f_c é o atrito lateral unitário na luva no CPT; e F_1 e F_2 são fatores de transformação de escala e tipo de estaca (Tabela 1).

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Tabela 1 – Valores dos coeficientes F₁ e F₂.

Tipo de Estaca	F₁	F₂
Escavada com lama bentonítica	3,5	4,5
Franki fuste apilado	2,3	3
Franki fuste vibrado	2,3	3,2
Hélice contínua	3	3,8
Microestaca	2,2	2,5
Raiz	2,2	2,4
Presso ancoragem	2,2	2,1
Metálica	1,75	3,5
Pré moldada de concreto cravada à percussão	2,5	3,5
Pré moldada de concreto cravada com prensagem	1,2	2,3
Strauss	4,2	3,9
Vibro Franki	2,4	3,2

Fonte: Adaptado de Gouveia (2018).

No Brasil o ensaio SPT é predominante, desta forma, quando não houver ensaio CPT, é admitido utilizar uma relação com o SPT. As variáveis q_c e f_c devem ser calculados pelas Equações (06) e (07), respectivamente.

$$q_c = K \cdot N_{spt} \quad (06)$$

$$f_c = \alpha \cdot K \cdot N_{spt} \quad (07)$$

Em que α (razão de atrito) e K são coeficientes dependentes do tipo de solo (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores dos coeficientes α e K.

Tipo de Solo	α	K (kPa)
Areia	1,40	1000,00
Areia siltosa	2,00	800,00
Areia silto-argilosa	2,40	700,00
Areia argilosa	3,00	600,00
Areia argilo-siltosa	3,80	500,00
Silte	3,00	400,00
Silte arenoso	2,20	550,00
Silte areno-argiloso	2,80	450,00
Silte argiloso	3,40	230,00
Silte argilo-arenoso	3,00	250,00
Argila	6,00	200,00
Argila arenosa	2,40	350,00
Argila areno-siltosa	2,80	300,00
Argila siltosa	4,00	220,00
Argila silto-arenosa	3,00	330,00

Fonte: Adaptado de Gouveia (2018).

Desta forma, as Equações (08) e (09) permitem calcular q_p e q_l , respectivamente.

$$q_p = \frac{K \cdot N_{spt}}{F_1} \quad (08)$$

$$q_l = \frac{\alpha \cdot K \cdot N_{spt}}{F_2} \quad (09)$$

2.3 Método de Décourt-Quaresma (1978)

O método de Décourt-Quaresma (1978) foi apresentado pelos engenheiros Luciano Décourt e Arthur Quaresma em 1978 inicialmente e depois modificado em 1996. O método de cálculo utilizado consiste na estimativa das resistências unitária lateral e unitária de ponta (JOPPERT, 2007; MAGALHÃES, 2005), já que o método não visa a obtenção de valores exatos, mas sim de uma estimativa de aproximada e segura de ambas as resistências.

Para o cálculo da capacidade de carga (Q_c) soma-se a parcela da resistência lateral com a resistência de ponta – vide Equação (10).

$$Q_c = Q_l + Q_p \quad (10)$$

Em que Q_p é a parcela da resistência de ponta (tf); e Q_l é a parcela da resistência lateral (tf). Com a substituição dos respectivos valores de Q_l e Q_p , pode-se reescrever a Equação (10), resultando a Equação (11).

$$Q_c = \sum q_l \cdot \beta \cdot P_l \cdot L + \alpha \cdot q_p \cdot A_p \quad (11)$$

Em que: β é o fator de correção da resistência lateral (kN); q_l é a resistência unitária lateral (tf/m²); P_l é o perímetro da seção transversal da estaca (m); L é o comprimento do segmento de estaca analisado (m); α é o fator para correção da resistência de ponta; q_p é a resistência unitária de ponta ou tensão de ponta (tf/m²); e A_p é a área de ponta da estaca (m²).

Os valores respectivos de α e β são tabelados e obtidos com base no tipo de solo e de estaca a ser utilizada. As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores de α e β para cada tipo de estaca.

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Tabela 3 – Fator α para correção de resistência de ponta.

Solo	Estacas cravadas	Escavadas em geral	Escavada com lama bentonítica	Hélice contínua	Raiz
Argila	1,00	0,80	0,85	0,30	0,85
Solo intermediário	1,00	0,60	0,60	0,30	0,60
Areias	1,00	0,50	0,50	0,30	0,50

Fonte: Adaptado de Gouveia (2018).

Tabela 4 – Fator β para correção da resistência lateral.

Solo	Estacas cravadas	Escavadas em geral	Escavada com lama bentonítica	Hélice contínua	Raiz
Argila	1,00	0,80	0,90	1,00	1,50
Solo intermediário	1,00	0,65	0,75	1,00	1,50
Areias	1,00	0,50	0,60	1,00	1,50

Fonte: Adaptado de Gouveia (2018).

As resistências unitárias lateral e de ponta são baseadas no valor do N_{SPT} , de acordo com as Equações (12) e (13), respectivamente.

$$q_l = \frac{N_m}{3} + 1 \quad (12)$$

$$q_p = K \cdot N \quad (13)$$

Em que: N_m é o valor médio do N_{SPT} no segmento analisado; K é o coeficiente determinado pelo tipo de solo (vide Tabela 5); e N é o índice de resistência à penetração na profundidade de assentamento da estaca.

Tabela 5 – Valores de K em função do solo.

Solo	K (kN/m²)
Argiloso	120
Silte Argiloso	200
Silte Arenoso	250
Areia	400

Fonte: Adaptado de Gouveia (2018).

A capacidade de carga geotécnica de projeto pode ser calculada pela Equação (14).

$$Q_{adm} = \frac{Q_c}{F} \quad (14)$$

Em que: Q_{adm} é a carga admissível da estaca; Q_c é a capacidade de carga da estaca; e FS é o fator de segurança adotado. Nesse contexto, a NBR 6122 (ABNT, 2019) define que, para resistência calculada através de métodos semiempíricos, deve ser utilizado $FS = 2$. Por sua vez, quando a resistência for obtida por meio de ensaios de prova de carga, pode-se adotar $FS = 1,6$.

No método de Décourt-Quaresma (1978), especificamente, está fixada a utilização do fator de segurança de 1,3 para a parcela de resistência lateral e 4,0 para resistência de ponta, conforme Marangon (2018). Consequentemente, a determinação da carga admissível é feita pela Equação (15).

$$Q_{adm} = \frac{Q_l}{1,3} + \frac{Q_p}{4,0} \quad (15)$$

Estaca hélice contínua e pré-moldada em concreto

A estaca hélice contínua trata-se de uma estaca de concreto moldada *in loco*, executada por meio da introdução no terreno, por rotação, de um trado helicoidal contínuo no terreno e injeção de concreto pela própria haste central do trado, simultaneamente à sua retirada. A armadura dessa estaca é introduzida após o lançamento do concreto (ABNT NBR 6122, 2019).

Por sua vez, a estaca pré-moldada consiste na estaca constituída de segmentos de pré-moldado ou pré-fabricado de concreto e introduzida no terreno por golpes de martelo de gravidade, de explosão, hidráulico ou por martelo vibratório (ABNT NBR 6122, 2019).

3 METODOLOGIA

A primeira etapa para a realização do trabalho consistiu em contactar profissionais e instituições que atuam no ramo de engenharia, e executam ensaios e projetos de fundações, a fim de obter resultados reais de testes de perfuração e perfis estratigráficos, e autorização para utilização dos resultados dos ensaios em pesquisa acadêmica, com o intuito de aplicar as formulações dos métodos semiempíricos em cenários variados e simular do cálculo do sistema de fundações.

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Em seguida, foi construído um inventário com 20 resultados de ensaios SPT, os quais foram selecionados a fim de englobarem solos com características distintas varrendo o maior número de regiões do território brasileiro, e que tenham transcorridos seguindo procedimento em concordância com os processos de perfuração determinados no item 6.2 da NBR 6484 (ABNT, 2021), ou versões anteriores, para assim alcançar resultados de estudo padronizado. A Tabela 6 expõe o inventário da presente pesquisa, indicando as cidades e UF dos ensaios SPTs.

Tabela 6 – Inventário de ensaios SPTs analisados.

Nº	Cidade	UF	Nº	Cidade	UF
1	Jardim Botânico	DF	11	Araraquara (SP 255)	SP
2	Nova Mutum	MT	12	Brusque	SC
3	São José do Rio Preto	SP	13	Santa Bárbara d'Oeste	SP
4	Sertãozinho	SP	14	Touros	RN
5	Sinop (obra 01)	MT	15	Lapa	PR
6	Sinop (obra 02)	MT	16	Varginha	MG
7	Sorriso (obra 01)	MT	17	Santo Antônio de Posse	SP
8	Sorocaba	SP	18	Lucas do Rio Verde	MT
9	São Bernardo do Campo	SP	19	Sorriso (obra 02)	MT
10	Guarujá (SP 061)	SP	20	Macatuba	SP

Fonte: Autores.

Com base no acervo obtido, foi realizada uma classificação dos resultados dos ensaios SPT: os arquivos foram agrupados em função da resistência do solo, classificação dos solos por perfil estratigráfico e altura do lençol freático.

Por fim, foi desenvolvida uma planilha eletrônica, no software Microsoft Office Excel, com as formulações de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978). Foi adotada a estratégia de utilizar programação de meio eletrônico de cálculo, a fim de garantir confiabilidade a aplicação dos métodos semiempíricos, e tornar factível os cálculos de capacidade de carga das estacas. Adotou-se para o presente estudo estacas pré-moldadas e hélice contínua, com diâmetro de 30 cm.

Para o preenchimento da planilha elaborada, foi definido como estratégia o arrasamento das sondagens na cota de 18 m, para os ensaios que não alcançaram a cota estabelecida, foram imputados na planilha os valores de N_{SPT} obtidos até o limite de cravação. Para o estudo, foram ainda ignorados os fatores de interrupção das sondagens, não qualificando de forma dissemelhante a interrupção da perfuração do solo.

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

No inventário dos ensaios SPT, havia amostras cujas caracterizações não eram compatíveis com os coeficientes K e α em função do solo na formulação de Aoki-Velloso (1975), e K no método de Décourt-Quaresma (1978), desta forma, os ensaios que apresentaram camadas classificadas como “cascalho”, “pedregulho” e “pedregulho arenoso”, assumiram as características de “areia”, para os coeficientes acima citados. As Tabelas 7 e 8 apresentam os coeficientes das aproximações consideradas para os métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978), respectivamente.

Tabela 7 – Aproximação de solos característicos para a formulação de Aoki-Velloso (1975).

Caracterização do solo	Tipo de solo aproximado	K (kPa)	α (%)
Areia fina	Areia	1000,00	1,40
Areia grossa	Areia	1000,00	1,40
Areia fina pouco argilosa	Areia argilosa	600,00	3,00
Pedregulho siltoso	Areia siltosa	800,00	2,00
Argila pouco arenosa	Argila arenosa	350,00	2,40

Fonte: Autores.

Tabela 8 – Aproximação de solos característicos para a formulação de Décourt-Quaresma (1978).

Caracterização do solo	Tipo de solo aproximado	K (kN/m ²)
Areia fina	Areia	400
Areia grossa	Areia	400
Areia fina pouco argilosa	Areia	400
Pedregulho siltoso	Areia	400
Argila pouco arenosa	Argila	120

Fonte: Autores.

Por fim, foi elaborado um indicador de relação, denominado de R , que consiste na divisão das capacidades de cargas geotécnicas. Para o presente trabalho, foi adotado a divisão dos resultados obtidos pelo método de Aoki-Velloso (1975), pela capacidade de carga geotécnica resultante na formulação de Décourt-Quaresma (1978), conforme demonstrado na Equação (16).

$$R = \frac{R_{adm} \text{ (Aoki-Velloso)}}{R_{adm} \text{ (Décourt-Quaresma)}} \quad (16)$$

A criação de tal indicador é importante para demonstrar o comportamento dos ensaios em um único gráfico, facilitando a compreensão dos resultados. De posse dos valores obtidos

a partir da entrada dos dados dos ensaios de SPT na planilha eletrônica, realizou-se análise comparativa do experimento teórico, entre os resultados dos métodos semiempíricos para estacas pré-moldadas e estacas moldadas “*in loco*”, do tipo hélice contínua.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

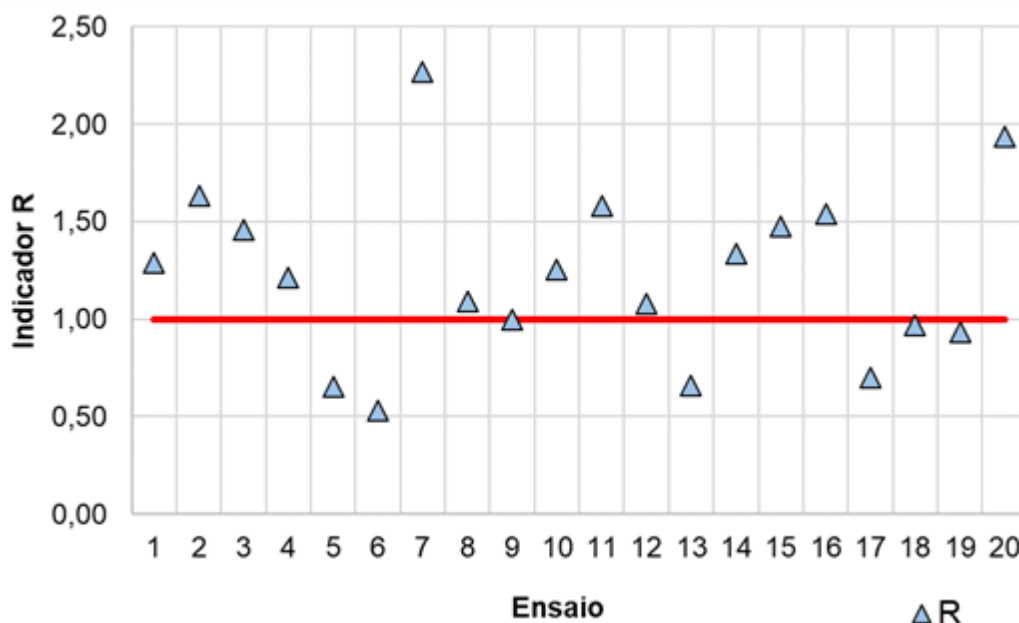
Para a apresentação dos resultados obtidos, a presente seção está dividida em dois tópicos. No primeiro está exposto a comparação das capacidades de carga geotécnica em simulação das estacas hélice contínua, e no segundo tópico, constam as análises para estacas do tipo pré-moldadas cravadas a percussão.

Após obter os resultados de carga geotécnica para as duas formulações, o coeficiente R foi aplicado em todos os ensaios, gerando então, valores flutuantes, representados em um único gráfico, que permite observar qual formulação resulta na maior capacidade de carga geotécnica. A partir do coeficiente é possível ainda identificar os ensaios que apresentaram valores *outliers*.

4.1 Resultados comparativos de capacidade de carga geotécnica em estacas hélice-contínuas

A Figura 1, apresenta os valores comparativos para o coeficiente R, obtidos para estacas do tipo hélice contínua. Sabendo que o coeficiente é resultado da divisão das capacidades de cargas geotécnicas do método de Aoki-Velloso (1975), pela formulação de Décourt-Quaresma (1978), pode-se interpretar que os valores flutuantes imediatamente acima de 1,00, indicam que a formulação de Aoki-Velloso (1975) apresentou capacidade de carga superior ao método de Décourt-Quaresma (1978). Por sua vez, os valores abaixo de um 1,00 indicam condição inversa, ou seja, que o método de Décourt-Quaresma (1978) resultou em capacidades de carga geotécnicas superiores à de Aoki-Velloso (1975).

Figura 1 - Gráfico comparativo do indicador R das capacidades de cargas geotécnicas para estacas do tipo hélice contínua.



Fonte: Autores.

Na Figura 1, pode-se observar que 65 % dos ensaios, o método de Aoki-Velloso (1975) resultou em capacidade de carga geotécnica superior. Há ainda um ensaio que apresentou, aproximadamente, $R = 1,00$, ou seja, os métodos encontraram a mesma capacidade de carga, e há seis casos em que a formulação de Décourt-Quaresma (1978) apresentou capacidade de carga geotécnica superior ao método de Aoki-Velloso (1975).

Observa-se ainda, que o resultado do ensaio 7, para a formulação de Aoki-Velloso (1975), se aproximou de 2,5 vezes a capacidade de carga encontrada no método de Décourt-Quaresma (1978). E que os ensaios 5, 6, 13 e 17 ficaram abaixo do indicador R, em imediação à 0,5.

Sabendo-se que foram utilizadas formulações semiempíricas distintas, porém, aplicando fator de correção de resistência lateral e de ponta, para estaca do tipo hélice contínua, conclui-se que as variações resultantes demonstradas no gráfico da Figura 1, foram motivadas pelas diferenciações das estratigrafias dos solos.

Ao analisar os ensaios 5, 6, 13 e 17, cujos valores de R foram inferiores a 1,00, verificou-se a estratigrafia dos solos buscando entender tal comportamento. Observou-se, nos ensaios acima citados, a dominância de solos como silte e argila.

Conclui-se então que a metodologia de Décourt-Quaresma (1978), para estacas hélice contínua, resulta em valores de capacidade de carga geotécnica maiores que os Aoki-Velloso (1975), para solos siltosos e argilosos. Por sua vez, o inverso ocorre solos predominantemente arenosos.

Ademais, vale ressaltar que, no ensaio 7, o indicador R resultou cerca de 2,25. Isso significa que, para esse N_{SPT} , o método de Aoki-Velloso (1975) acarretou numa capacidade de carga de, aproximadamente, 225% superior à capacidade de carga calculada pelo método de Décourt-Quaresma (1978). Nesse ensaio, em especial, há, majoritariamente, solos siltosos. Pode-se ainda dividir o material da amostra 7 em três segmentos, o primeiro, com camada de oito metros de “silte argiloso”, o segundo, também com camada de oito metros de “silte arenoso”, e o terceiro, já na cota de arrasamento com dois metros de “areia siltosa”. Para a camada de ponta, em especial, verificou-se que a areia contribuiu fortemente para a divergência dos resultados na resistência de ponta.

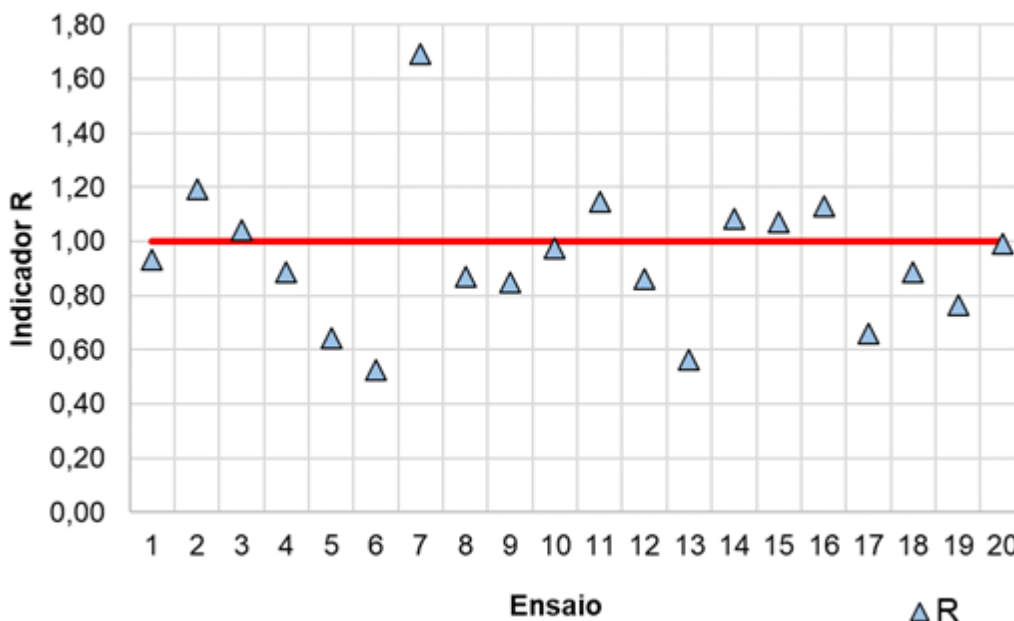
Analisando o gráfico é percebido que o ensaio 9, o resultado de R foi igual a 1,00 ($R = 1,00$), tal condição indica que os dois métodos aplicados resultaram em capacidade de carga idêntica. Ao analisar a estratigrafia, foi encontrado material predominantemente siltoso, com variação de camadas com presença de argila, e camadas com presença de areia, fator que pode ter moderado a capacidade de carga geotécnica do solo, não apontando tendência de superioridade para as formulações estudadas.

Para os demais ensaios, ao verificar a estratigrafia dos solos, observa-se que há solos mais arenosos. Tal condição reforça a ideia de que para estacas do tipo hélice contínua, solos arenosos tendem a apresentar capacidade de carga superior para a formulação de Aoki-Velloso (1975).

4.2 Resultados comparativo de capacidade de carga geotécnica em estacas pré-moldadas cravadas por percussão

A Figura 2, apresenta os valores comparativos para o coeficiente R, obtidos para estacas pré-moldadas cravadas por percussão.

Figura 2 - Gráfico comparativo do indicador R das capacidades de cargas geotécnicas para estacas do tipo hélice contínua.



Fonte: Autores.

Na Figura 2 pode-se observar que para cálculo das capacidades de cargas geotécnicas em estacas pré-moldadas, 65 % dos ensaios apresentam maiores valores de capacidade de carga ($R < 1$) para a formulação de Décourt-Quaresma (1978). O fenômeno observado foi o contrário ao encontrado para a análise das estacas hélice contínua.

Ainda analisando o gráfico da Figura 2, observa-se que o resultado do ensaio 4, apresentou pelo método de Aoki-Velloso (1975), uma capacidade de carga geotécnica aproximada de 1,70, obtendo o valor mais afastado de R, e que os resultados dos ensaios 5, 6, 13 e 17, mantiveram a resposta de maior capacidade de carga admitida para Décourt-Quaresma (1978).

Para a compreensão dos resultados, foram analisados os perfis estratigráficos dos solos ensaiados. Salientando que, o gráfico apresentado na Figura 2 detalha o comportamento da estaca do tipo pré-moldada, tendo os coeficientes de correção de resistência de ponta e lateral aplicados conforme o tipo de estaca estudada.

Sabe-se que os solos dos ensaios 5, 6, 13 e 17, tem classificação com dominância em material silteoso. Sabe-se ainda que o solo da amostra 7, apesar de possuir dominância de camadas com material silteoso, há no limite de arrasamento, uma camada de dois metros de solo com classificação arenosa.

Pode-se ainda observar que para estacas pré-moldadas, houve menor amplitude do resultado de capacidade de carga geotécnica dos demais ensaios, isso é, apresentaram variação de 0,2 acima ou abaixo do coeficiente R. Tal condição permite com que se separe os resultados em dois grandes grupos, os que resultaram em capacidade de carga geotécnica superior para Aoki-Velloso (1975), que comporta os ensaios 2, 3, 11, 14, 15 e 16. E os ensaios cujo valores do método de Décourt-Quaresma (1978) apresentaram capacidade de carga superior, sendo composto pelas amostras 1, 4, 8, 9, 10, 12, 18, 19 e 20.

O primeiro grupo, onde a formulação de Aoki-Velloso (1975) apresentou o maior valor de capacidade de carga geotécnica, possui característica de classificação de solo com dominância em material arenoso. E por sua vez, o segundo grupo, há amostras de classificação mista de solos, com dominância em materiais argilosos, com presença de areia e silte.

Tais fatores corroboram com a hipótese apresentada no tópico anterior, de que a metodologia de Décourt-Quaresma (1978) é sensível a camadas de areia, minorando os valores resultante da capacidade de carga geotécnica, gerando maior amplitude entre os resultados.

Pode-se concluir que para cálculo de estacas pré-moldadas, a formulação de Décourt-Quaresma (1978) resulta maior capacidade de carga em solos siltosos e argilosos. Já o método de Aoki-Velloso (1975) resulta em maior capacidade de carga geotécnica para estacas pré-moldadas em solo arenoso.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve o objetivo de comparar, para diferentes tipos de solos, os métodos semiempíricos destinados ao cálculo da capacidade de carga de estacas. Conforme destacado pela literatura observou-se grande discrepância nos resultados de capacidade de carga geotécnica para os métodos existentes na literatura, quando comparados os métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978).

Para estacas hélice contínuas o método de Aoki-Velloso (1975) foi o que resultou em valores mais elevados de capacidade de carga geotécnica, ocorrendo sobretudo para solos com maiores frações de materiais arenosos. Por sua vez ainda nas estacas hélice contínua, o método de Décourt-Quaresma (1978) foi superior ao de Aoki-Velloso (1975) em solos com maiores frações de silte e argila.

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Já para as estacas pré-moldadas o método que resultou em maior capacidade de carga geotécnica foi o de Décourt-Quaresma (1978), ocorrendo em solos com frações dominantes de materiais argilosos, com presença de areia e silte. Por sua vez o método de Aoki-Velloso (1975), para estacas pré-moldadas, foi superior ao de Décourt-Quaresma (1978) em solos com predominância de material arenoso.

Portanto, dada a variabilidade dos tipos de solos e dos tipos de estacas, recomenda-se aplicar os dois métodos e para maximizar a segurança utilizar a menor capacidade de carga geotécnica resultante entre os métodos.

Para trabalhos futuros recomenda-se a realização de trabalhos similares analisando outros métodos da literatura, destinados ao cálculo da capacidade da carga de estacas e/ou comparando os métodos semiempíricos com métodos teóricos ou métodos de prova de carga.

REFERÊNCIAS

- Aoki, N., & Velloso, D. A. (1975). Um Método Aproximado para Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas. **In: Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, Buenos Aires, Anais, p. 367-376.
- Araujo, B. K. S. **Cálculo de capacidade de carga em estacas utilizando métodos semi-empíricos: abordagem probabilística dos resultados**. (2019). Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). (2021). **NBR 6484: Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2021.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). (2010). **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). (2019). **ABNT NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT.
- Bernardes, H. C. (2021). Aplicação de Análise Probabilística ao Cálculo de Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 8, n. 1, p. 53-68.
- Brasfond. (1991). **Catálogo técnico sobre estacas raiz**. Guarulhos. Crateús: Universidade Federal do Ceará.
- Décourt, L., & Quaresma, A. R. (1978). **Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT**. Anais VI COBRAMSEF, Rio de Janeiro, vol. 1, pp. 45-53.
- Gouveia, L. A. (2018). **Análise Comparativa da Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua por meio de Provas de Carga e por métodos Semiempíricos**. Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
- Jesus, A. D. (2017). **Análise de métodos semi-empíricos para previsão de capacidade de**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS DESTINADOS AO CÁLCULO DA
CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS**

- carga de estacas raiz.** 2017 Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Joppert, I. (2007). **Fundações e contenções em edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução.** 1. ed. São Paulo: PINI.
- Labanca, A. C. F. (2021). **Análise da determinação da capacidade de carga de estacas escavadas utilizando métodos semi-empíricos brasileiros.** Repositório de Trabalhos de Conclusão de Curso.
- Lizzi, F. (1982). The pali radice (root piles) - A state-of-the-art report. **In: International Symposium On Recent Developments In Ground Improvement Techniques**, 1982, Bangkok, Thailand. Proceedings. Bangkok: Asian Institute Of Technology, v. 1, p. 417-432;
- Lobo, O. B. (2005). **Método de Previsão de Capacidade de Carga de Estacas: Aplicando os conceitos de energia do ensaio SPT.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univ. Fed. do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Magalhães, P. H. L. (2005). **Avaliação dos Métodos de Capacidade de Carga e Recalque de Estacas Hélice Contínua via Provas de Carga.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-141/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 243 p.
- Metropolis, N., & Ulam, S. The Monte Carlo method. (1949). **Journal of the American Statistical Association**, v. 44, p. 335–341
- Monteiro, T. M., Araújo, C. B. C., & Aguiar, M. F. P. (2017). Análise de métodos semi-empíricos nacionais e internacionais para determinação da capacidade de carga axial em estacas. **Revista Tecnologia**, v. 38, n. 2.
- Rodrigues, M. C., Rambo, L. H.; Amanajás, C. S., & Souza, T. J. (2020). **Análise Comparativa de Capacidade de Carga em Estacas Hélice Contínua entre Métodos Semi-Empíricos e Prova de Carga Estática em Macapá-AP.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 10, Campinas.
- Silva, R. R. C. (2018). Previsão da capacidade de carga em estacas raiz através de métodos semi-empíricos associados a análises estatísticas. **Revista CIATEC-UPF**, v. 10, n. 2.