

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/262

# Análise Comparativa da Capacidade de Carga de Estaca Pré-Moldada em uma Obra de Infraestrutura Viária na Grande Florianópolis.

Anna Eduarda Rocha Madureira

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu/PR, Brasil,  
annaermadureira@gmail.com

Juliana Leão de Oliveira

Faculdade Estácio, Florianópolis/SC, Brasil, julianafs\_14@hotmail.com

Luiz Fernando Farias

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil, luizfrnfarias@gmail.com

Otto Tomaszewski Milan Mota

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil, tomaszewski.otto@gmail.com

Yan Budni de Souza

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brasil, yanbudnydesouza@gmail.com

**RESUMO:** O estudo avaliou a previsão da capacidade de carga de uma fundação em estaca pré-moldada centrifugada de 600 mm de diâmetro em uma Obra de Arte Especial em Palhoça, na Grande Florianópolis. Métodos semiempíricos, fórmulas dinâmicas e modelagem numérica foram empregados, e comparou-se os resultados obtidos com a prova de carga estática (PCE) realizada. Os métodos semiempíricos basearam-se em dados de sondagem, a modelagem numérica simulou o comportamento da PCE, e as fórmulas dinâmicas utilizaram dados do boletim de cravação da estaca. As comparações entre os métodos e o resultado da PCE foram realizadas para avaliar a confiabilidade das técnicas analisadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fundações, Capacidade de carga, Prova de carga estática, Estaca pré-moldada, Modelo numérico.

**ABSTRACT:** The study evaluated the prediction of the load capacity of a precast pile foundation with a diameter of 600 mm in Palhoça, Greater Florianópolis region. Semiempirical methods, dynamic formulas, and numerical modeling were employed, with results compared to those obtained in the static load test (SLT). The semiempirical methods were based on soil survey data, numerical modeling simulated the behavior of the SLT, and dynamic formulas utilized data from the pile driving record. Comparisons between the methods and the SLT results were conducted to assess the reliability of the analyzed techniques.

**KEYWORDS:** Foundations, Load Capacity, Static load test, Precast pile, Numerical model

## 1 INTRODUÇÃO

O acúmulo de experiências e o desenvolvimento teórico no estudo do comportamento de fundações possibilitaram a criação de diversas técnicas para estimar a resistência oferecida pelos elementos de fundação. Contudo, é importante destacar que existem diferenças entre os resultados obtidos por esses métodos e o

comportamento real do sistema solo-estaca. A análise da capacidade de carga de fundações profundas é um problema complexo devido à influência de diversas variáveis, como os parâmetros geotécnicos do subsolo, as características estruturais das estacas e o processo construtivo. O presente trabalho avalia a previsão da capacidade de carga da fundação em estaca pré-moldada centrifugada com 600 mm de diâmetro, projetada e executada como fundação de uma Obra de Arte Especial na cidade de Palhoça na região da Grande Florianópolis. Para tanto, foram utilizados métodos semiempíricos, fórmulas dinâmicas e modelagem numérica, procedendo à comparação dos resultados com os obtidos no ensaio de prova de carga estática (PCE). Foram utilizados os métodos semiempíricos de Décourt – Quaresma, Aoki & Velloso e Teixeira, utilizando os dados obtidos da sondagem mista (SM), realizada no local de estudo. Para o modelo numérico foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF), com o objetivo de simular o comportamento da prova de carga estática e se obter uma curva de carga versus deslocamento, no qual se considerou os parâmetros obtidos através dos ensaios de campo e laboratório. Foram utilizadas as fórmulas dinâmicas de Brix e dos Holandeses para a obtenção da resistência do solo, utilizando os dados do boletim de cravação da estaca. Por fim, para a prova de carga, foi aplicado sobre a estaca o dobro da carga de trabalho, conforme previsto em norma. Com todos os resultados, foram realizadas comparações entre os valores utilizando os métodos expostos e os obtidos da prova de carga, e assim foi avaliada a confiabilidade dos métodos analisados.

## 1.1 PROVA DE CARGA

A prova de carga estática foi realizada em uma estaca pré-moldada pertencente ao projeto de fundação de uma OAE que conta com um total de 416 estacas centrifugadas de 600 mm de diâmetro e 21,0 metros de comprimento, em média. A Figura 1 ilustra a localização da estaca ensaiada, de número E.148, no apoio 4 da obra de arte especial.

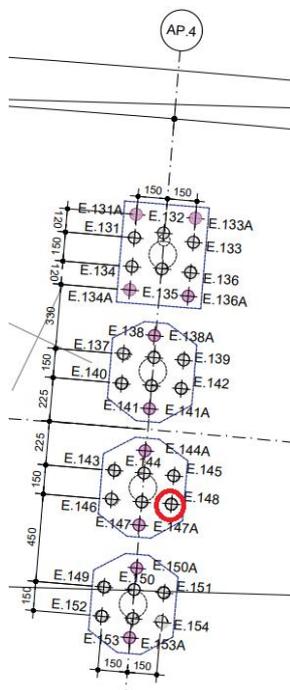


Figura 1. Localização das estacas do apoio 4 (projeto executivo, 2023).

O ensaio PCE foi realizado aplicando-se um carregamento axial de compressão por meio de um macaco hidráulico e utilizou-se tirantes para o sistema de reação. A estaca foi carregada até 360,0 toneladas, o dobro da carga especificada no projeto executivo, durante um período de 20 horas e ao fim, apresentou um recalque de 15,12 cm. Como não foi caracterizada uma ruptura nítida, procedeu-se ao descarregamento da estaca. A Figura 2 apresenta a execução da PCE.



Figura 2. Prova de carga estática (autores, 2023).

## 2 GEOLOGIA LOCAL

A região apresenta terreno aplainado com altitude variando entre 0 e 5 metros. Localmente, a obra está inserida parcialmente na planície de inundação do Rio Aririú com grande contribuição de ambiente transicional, o que caracteriza a região geomorfológica da Planície Costeira do Estado de Santa Catarina. O nível d'água observado no estudo de caracterização foi identificado com até 1,70 metros de profundidade, associado ao solo vegetal superficial.

De modo geral, as sondagens indicaram a presença de depósitos sedimentares de idade quaternária, sotopostos ao embasamento cristalino. Estes sedimentos estão associados ao sistema deposicional costeiro com influência dos ciclos de transgressão e regressão marinha, responsáveis pela formação de depósitos sedimentares de ambientes diversos. Devido à falta de um estudo mais aprofundado na região, os sedimentos da Planície Costeira foram classificados como indiferenciados, sendo categorizados apenas pelas variações granulométricas encontradas nas sondagens.

A sondagem realizada no local de execução da estaca possui profundidade total de 38,58 metros, e apresenta ao longo de seu comprimento uma predominância de solos provenientes da sedimentação de planície costeira (nos primeiros 35,88 metros), seguido por um horizonte de solo residual e rocha alterada fragmentada (últimos 2,70 metros).

O solo local apresenta inicialmente camadas de areia fina à média e argila arenosa mole intercaladas, de espessuras de 1,5 à 4 metros. Abaixo destas, à partir de 9,8 metros da sondagem, há uma grande camada argilo-siltosa plástica com matéria orgânica e de cor preta, indo até os 22,80 metros de sondagem. Em seguida há uma camada de cascalho de 1,6 metros de cascalho, um depósito de seixos, grânulos e areia, de possivelmente oriunda de um depósito de canal fluvial, levando em consideração o contexto de sedimentação de planície costeira. Imediatamente abaixo, há a última camada de solo sedimentar observada, composta por areia média argilosa compacta. À partir dos 30 metros observou-se solo residual e fragmentos de rocha proveniente da degradação do embasamento ígneo (Riolito Cambirela), conforme apresentado na Figura 3.

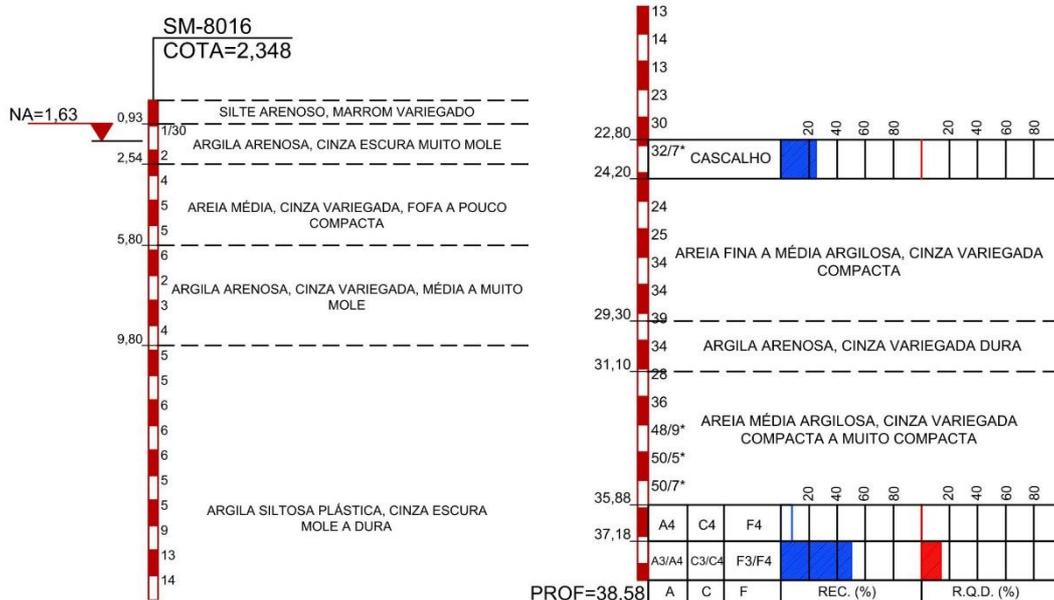


Figura 3. Perfil geológico (autores, 2024).

A Tabela 1, apresenta os parâmetros utilizados na análise, obtidos por meio de coleta de amostras para ensaios geotécnicos de laboratório.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos (autores, 2024).

Parâmetros	Solo			
	Argila arenosa	Areia	Argila siltosa mole	Argila siltosa dura
$\phi$ (°)	22	30	15	21
c (kPa)	14	10	19	24
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15	18	16	19
E (kPa)	32000	35000	4000	40000
$\nu$	0,35	0,28	0,4	0,28
k (m/s)	1,00E-07	1,00E-05	1,00E-07	1,00E-07

### 3 METODOLOGIA

Para análise da capacidade de carga do solo foram utilizados métodos semiempíricos, dinâmicos e modelagem numérica em elementos finitos.

Os métodos semiempíricos de Aoki & Veloso (1975), Decourt & Quaresma (1978) e Teixeira (1996) utilizam os dados da sondagem à percussão combinados com coeficientes empíricos definidos para cada tipo de solo. Os coeficientes utilizados para os cálculos, nos casos de Decourt & Quaresma e Teixeira foram os fornecidos pelos próprios autores, para a análise pelo método de Aoki & Veloso foram utilizados os coeficientes fornecidos por Laprovitera (1988), Monteiro (1997) e também os de Aoki & Veloso (1975). Como esses parâmetros não foram definidos para a camada de cascalho, para obter a resistência de ponta da estaca quando apoiada sobre o material, foram adotados valores equivalentes aos de uma camada de areia de  $N_{sp}$  igual a 50 tanto pelo projetista quanto pelos autores do artigo.

A análise pelos métodos dinâmicos foi utilizada para relacionar os dados apresentados pelo boletim de cravação com a resistência do solo à penetração da estaca. As equações dos Holandeses e de Brix foram aplicadas para o cálculo nega.

Buscou-se simular a curva de carga vs recalque para obtenção da capacidade de carga por meio de método numérico por elementos finitos através do *software* Abaqus, para tanto, foi aplicado na cabeça da estaca o mesmo deslocamento apresentado no resultado da prova de carga estática e utilizou-se os dados das investigações geotécnicas realizadas no local da obra, conforme apresentado na Tabela 1.

Para a modelagem considerou-se um modelo axissimétrico de dimensões suficientes para evitar interferências na análise. A estatigrafia foi definida conforme perfil geológico-geotécnico já apresentado. Para o material da estaca definiu-se o modelo elástico linear, sendo necessário informar ao modelo o módulo de Young ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e peso específico ( $\gamma$ ), os valores adotados foram 37,00 GPa, 0,20 e 25,00 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente. Adotou-se o modelo constitutivo elástico linear para as camadas de solo, aplicando o modelo de Mohr-Coulum na ruptura. A Figura 4 exhibe a geometria adotada para o modelo.



Figura 4. Geometria do modelo numérico (autores, 2024).

Foi aplicado ao modelo uma malha de elementos finitos quadriláteros axissimétricos (CAX4P), de quatro nós, com deslocamentos e poropressão bilineares. Refinou-se a malha na região de interação solo-estrutura, conforme Figura 5.

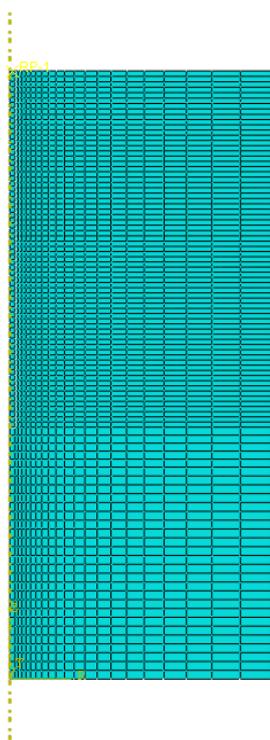


Figura 5. Malha de elementos finitos (autores, 2024).

#### 4 RESULTADOS

A sondagem realizada mostrou cerca de 12 metros de argila sedimentar mole e cinco de argila rija, seguida por uma camada de 1,4 metros de cascalho. As estacas pré-moldadas centrifugadas com 60 cm de diâmetro foram projetadas para serem apoiadas sobre a camada de cascalho, situada a cerca de 22,45 metros de profundidade. Durante o processo de cravação, no entanto, foi atingida a nega de projeto (15mm) e a estaca foi cravada com 20,50 metros de profundidade, cerca de 1,5 metros antes da camada de cascalho detectada na sondagem. A capacidade de carga e a nega esperadas para a estaca quando apoiada sobre argila e sobre cascalho, calculada a partir dos métodos semi empíricos comentados no capítulo anterior está presente na Tabelas 2. Como os métodos dinâmicos se tratam de relação entre a resistência à cravação de uma estaca e da nega, para se estimar a nega é necessário primeiro estimar a resistência do solo. Os valores de nega esperados para cada valor de resistência à cravação obtido pelos métodos empíricos está ilustrado na tabela 3.

Tabela 2. Métodos semiempíricos (autores, 2024).

Método	Coeficientes	CAPACIDADE DE CARGA		
		CASCALHO (tf)	ARGILA (tf)	$\Delta$
Aoki & Veloso	Aoki & Veloso	960,5	177,2	18%
	Laprovitera	574,8	187,2	33%
	Monteiro	490,0	170,9	35%
Decourt & Quaresma	-	484,1	203,1	42%
Teixera	-	334,0	175,1	52%
Média	-	497,8	185,6	37%

Tabela 3. Nega pelos métodos dinâmicos (autores, 2024).

CASCALHO			ARGILA		
RESISTÊNCIA À CRAVAÇÃO (tf)	HOLANDESES (mm)	BRIX (mm)	RESISTÊNCIA À CRAVAÇÃO (tf)	HOLANDESES (mm)	BRIX (mm)
960,5	2,0	1,3	177,2	11,7	7,3
574,8	3,4	2,2	187,2	11,1	6,9
490,0	4,0	2,6	170,9	12,1	7,6
484,1	4,0	2,6	203,1	10,2	6,4
334,0	5,9	3,8	175,1	11,8	7,4
497,8	4,4	2,8	185,6	11,2	7,0

Os resultados da prova de carga estática, em concordância com a nega obtida em campo, apontam para a capacidade de carga do solo muito superior ao que se esperaria de uma estaca apoiada em argila.

Uma possível explicação para o fenômeno é o contato direto entre a estaca e a camada de material granular, que pelas irregularidades na sua profundidade pode ter, no ponto de cravação, cota diferente da observada na sondagem. Entretanto, devido a camada de cascalho ter provável origem de depósito fluvial, e, por consequência, uma morfologia relativamente constante, esta hipótese pode não ser justificada.

Outra possível explicação é que o material granular, embora não tenha entrado em contato direto com a fundação, causou alteração da superfície crítica de ruptura do solo, levando ao aumento da resistência à penetração da estaca e portanto o valor observado na prova de carga seria um estado intermediário entre a mobilização total da resistência dessa camada e o apoio completo sobre material argiloso situado logo acima.

A Figura 6 exibe a curva de carga vs recalque da prova de carga realizada em campo, tendo sido realizado sua extrapolação pelo método de Van Der Veen (1953), onde se obteve uma carga de ruptura de 446,00 tf, também aplicou-se o método de ruptura convencional apresentado pela NBR 6122, obtendo-se uma carga de ruptura de 437,00 tf. Por fim, através da modelagem numérica se obteve uma carga de ruptura de 418,00 tf.

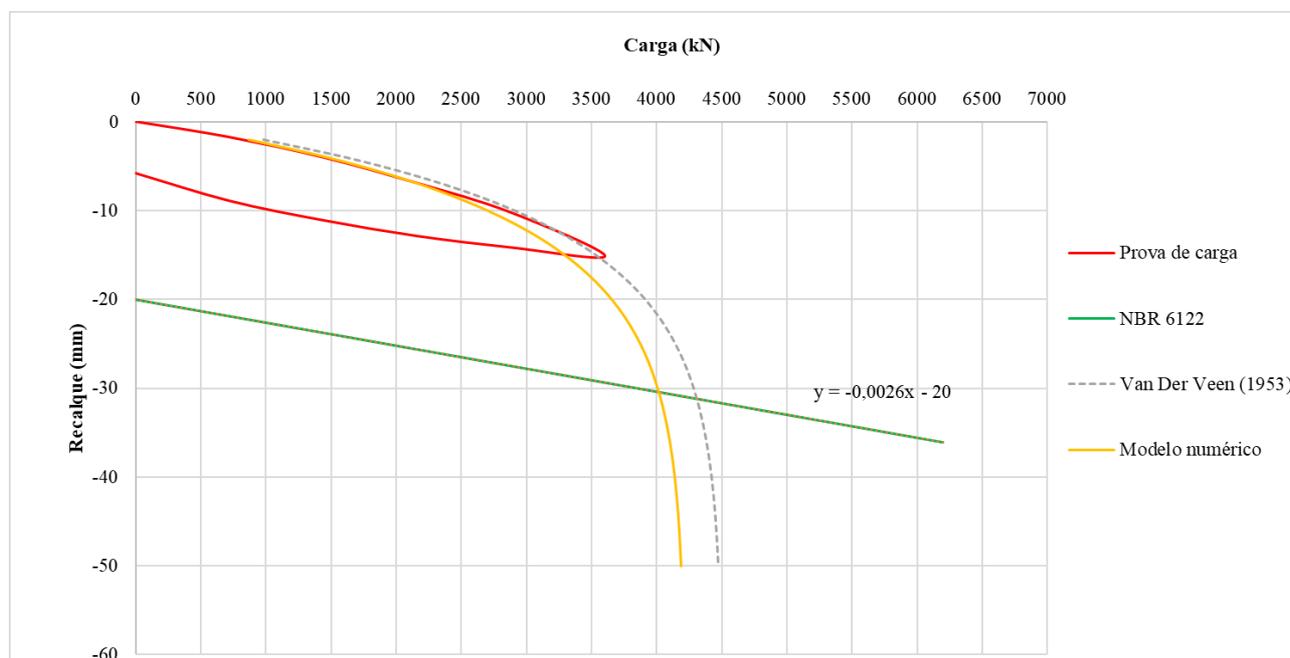


Figura 6. Curva carga vs recalque (autores, 2024).

## 5 CONCLUSÃO

Para os métodos semiempíricos constatou-se diferenças entre os mesmos, que se justificam pela formulação proposta por cada autor. Considerando que a estaca esteja com a ponta apoiada na camada de cascalho, o valor da capacidade de carga se aproxima bastante do resultado da prova de carga estática, exceto o método de Aoki & Veloso que apresenta um valor bem superior aos demais.

Em relação ao modelo numérico, foi atingido uma carga de ruptura de 418,0 tf, ou seja, valor bem aproximado a PCE.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, Paulo José Rocha de; Gargia, Jean Rodrigo (2020). *Engenharia de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Cintra, José Carlos A.; Aoki, Nelson (2010). *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo.
- Danziger, Bernadete Ragoni; Lopes, Francisco de Rezende (2022). *Fundações em Estacas*. Rio de Janeiro.
- Décout, L; Quaresma, R. A. (1978). *Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT*. Rio de Janeiro.
- Teixeira, A. H. (1996). *Projeto e execução de fundações*. São Paulo.