



2026

Análise comparativa de capacidade de carga em estacas entre provas de carga estática e métodos semiempíricos.

Wesley Silva Alves Amaral ^a; José Otávio Serrão Eleutério ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, wesley.amaral@ufms.br

^b Professor Orientador, titulação, otavio.eleuterio@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

A estimativa da capacidade de carga de estacas é comumente realizada por meio de métodos semiempíricos consagrados. A validação dessa estimativa muitas vezes é realizada por prova de carga estática, que é o método mais confiável de se obter a capacidade de carga de uma estaca. O dimensionamento adequado de um estaqueamento é fundamental para a segurança e viabilidade econômica do projeto de fundação profunda. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre as capacidades de carga estimadas por métodos semiempíricos e aquelas obtidas experimentalmente por provas de carga estática. O estudo foi desenvolvido com base na análise de quatro estacas, sendo duas pertencentes à Obra A e duas à Obra B, executadas no município de Sinop-MT. Para a estimativa da capacidade de carga, foram utilizados os métodos semiempíricos de Aoki e Velloso e de Decourt e Quaresma, cujos resultados foram comparados com os valores obtidos nas provas de carga estática. Durante a análise, observou-se que, para as estacas da Obra A, as capacidades de carga estimadas pelos métodos semiempíricos apresentaram valores inferiores aos experimentais, caracterizando um comportamento conservador, enquanto para as estacas da Obra B os valores estimados mostraram-se próximos aos resultados obtidos nas provas de carga, indicando boa concordância entre os métodos. Conclui-se que o desempenho dos métodos semiempíricos pode variar significativamente em função das características geotécnicas locais, tornando indispensável a utilização da prova de carga estática como ferramenta de validação das estimativas de capacidade de carga em projetos de fundações.

Palavras-chave: fundações, estacas, capacidade de carga, prova de carga estática, métodos semiempíricos.

ABSTRACT

Estimating the load-bearing capacity of piles is commonly done using well-established semi-empirical methods. Validation of this estimate is often carried out through static load testing, which is the most reliable method for obtaining the load capacity of a pile. Properly design a pile foundation is fundamental to the safety and economic viability of a deep foundation project. In this context, the present work aimed to perform a comparative analysis between the load capacities estimated by semi-empirical methods and those obtained experimentally through static load tests. The study was developed based on the analysis of four piles, two belonging to Project A and two to Project B, executed in the municipality of Sinop-MT. For the load capacity estimation, the semi-empirical methods of Aoki and Velloso and of Decourt and Quaresma were used, whose results were compared with the values obtained in the static load tests. During the analysis, it was observed that, for the piles of Project A, the load capacities estimated by the semi-empirical methods presented lower values than the experimental ones, characterizing a conservative behavior, while for the piles of Project B the estimated values were close to the results obtained in the load tests, indicating good agreement between the methods. It is concluded that the performance of semi-empirical methods can vary significantly depending on local geotechnical characteristics, making the use of static load testing indispensable as a tool for validating load capacity estimates in foundation designs.

Keywords: foundations, pile, load-bearing capacity, static load test, semi-empirical methods.

1 INTRODUÇÃO

A escolha do tipo fundação fundamenta-se na análise das características do subsolo e nos carregamentos previstos. Quando as cargas estruturais são elevadas e excedem a capacidade de carga das camadas mais superficiais, faz-se necessário transferi-las a estratos mais profundos e firmes. Nesses casos, emprega-se fundação profunda por estacas ou tubulões, visando assegurar a resistência e a estabilidade exigida.

Em geral, a estimativa da capacidade de carga de estacas é realizada por meio de métodos semiempíricos utilizando resultados de investigações geotécnicas *in situ*. Todavia, a natureza heterogênea e anisotrópica do solo, cujas propriedades podem variar consideravelmente ao longo de pequenas distâncias, aliada às simplificações inerentes aos modelos semiempíricos, geram incertezas significativas nas previsões de desempenho nesse tipo de fundação.

Neste contexto, a prova de carga estática consiste num método de referência para determinação da capacidade de carga de estacas. No ensaio, aplicam-se cargas incrementais diretamente no topo da estaca, monitorando-se deslocamentos e rigidez sob condições que reproduzem o carregamento real da estrutura, o que permite uma avaliação precisa do seu comportamento.

O presente trabalho visa apresentar o dimensionamento de quatro estacas, sendo duas do tipo hélice contínua e duas do tipo escavada segundo os métodos semiempíricos de Aoki e Velloso (1975) e de Décourt-Quaresma (1978), confrontando tais resultados com os obtidos em 4 provas de carga estática e, adicionalmente, avaliar as parcelas de esforço mobilizadas ao longo do fuste e na ponta das estacas, com a utilização do método da rigidez de Décourt (1996, 2008).

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Fundação em estacas

Estacas são elementos de fundação profunda responsáveis por transferir a carga da superestrutura para o solo. Em solos que apresentam camadas superficiais com baixa resistência, pode ser necessário alcançar camadas mais resistentes do subsolo. As estacas podem transferir carga por atrito lateral, por resistência de ponta ou pela combinação de ambos os mecanismos.

Segundo Alonso (2010) a principal função da fundação é garantir que as tensões geradas pela edificação ou qualquer obra de engenharia sejam compatíveis com a capacidade de suporte do terreno, visando a estabilidade da construção e o controle de recalques.

No Brasil, a norma que fornece diretrizes para projeto e execução de fundações é a ABNT NBR 6122:2022 – *Projeto e execução de fundações*. Essa norma estabelece critérios de projeto, prescreve metodologias de investigação do subsolo e regulamenta os modos de execução, e o controle de qualidade das fundações.

2.2 Métodos semiempíricos de dimensionamento

Os métodos semiempíricos partem de correlações entre resultados de ensaios de investigação geotécnica, como a sondagem a percussão SPT (Standard Penetration Test). Entre os métodos mais utilizados no Brasil, destacam-se:

- **Aoki e Velloso (1975):** correlacionam valores de NSPT (número de golpes necessários para cravar os últimos 30cm do amostrador padrão no solo) a cada 1m de profundidade com a resistência por atrito lateral e de ponta, sendo:

Resistência de ponta:

$$r_p = \frac{K \cdot N_p}{F_1}$$

Onde:

N_p : índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta da estaca;

K : fator de correção em função do tipo de solo;

F_1 : fator de correção em função do tipo de estaca.

Resistência por atrito lateral:

$$r_L = \frac{\alpha \cdot K \cdot N_L}{F_2}$$

Onde:

α : razão de atrito em função do tipo de solo;

F_2 : fator de correção em função do tipo de estaca.

N_L : índice de resistência à penetração médio na camada de solo Δ_L ;

Tabela 1 – Coeficientes K e α . Fonte: Aoki e Velloso (1975).

Tipo de solo	K (kgf/cm ²)	α (%)
Areia	10,00	1,40
Areia siltosa	8,00	2,00
Areia silto-argilosa	7,00	2,40
Areia argilosa	6,00	2,80
Areia argilo-siltosa	5,00	3,00
Silte	4,00	3,00
Silte arenoso	5,50	2,20
Silte areno-argiloso	4,50	2,80
Silte argiloso	2,30	3,40
Silte argilo-arenoso	2,50	3,00
Argila	2,00	6,00
Argila arenosa	3,50	2,40
Argila areno-siltosa	3,00	2,80
Argila siltosa	2,20	4,00
Argila silto-arenosa	3,30	3,00

Tabela 2 – Fatores de correção F1 e F2. Fonte: Aoki e Velloso (1975).

Tipo da estaca	F1	F2
Franki	2,50	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-moldada	1,75*	2F1
Escavada	3,00	2F1

* F1 = $1 - (D/0,80)$; proposto por Aoki em 1985 para estacas pré-moldadas de pequeno diâmetro. D em metros.

- **Décourt e Quaresma (1978):** também utiliza o ensaio SPT para estimar a capacidade de carga, definindo coeficientes tanto para a resistência de ponta quanto para o atrito lateral.

Resistência de ponta:

$$q_p = \alpha \cdot K \cdot N_p$$

Onde:

α : determinado em função do tipo de estaca;

K: coeficiente que relaciona a resistência de ponta com o valor de N_p ;

N_p : média dos valores de N_{SPT} na ponta da estaca, imediatamente acima e abaixo.

Resistência por atrito lateral:

$$q_s = \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_m}{3} + 1 \right)$$

Onde:

β : determinado em função do tipo de estaca;

N_m : valor médio do N_{SPT} ao longo do fuste da estaca.

Tabela 3 – Coeficiente característico do solo C. Fonte: Décourt e Quaresma (1978).

Solo	C (kPa)
Argila	120
Silte argiloso	200
Silte arenoso	250
Areia	400

Tabela 4 – Coeficiente α em função do tipo de estaca e do tipo de solo. Fonte: Décourt (1996).

Tipo de Estaca / Tipo de Solo	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice continua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,85	0,85	0,30*	0,85*	1,0*
Solos Intermediários	0,60	0,60	0,30*	0,60*	1,0*
Areias	0,50	0,50	0,30*	0,50*	1,0*

* Valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis.

Tabela 5 – Coeficiente β em função do tipo de estaca e do tipo de solo. Fonte: Décourt (1996).

Tipo de Estaca / Tipo de Solo	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice continua	Ômega	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,80	0,90*	1,0*	1,0*	1,5*	3,0*
Solos Intermediários	0,65	0,75*	1,0*	1,0*	1,5*	3,0*
Areias	0,50	0,60*	1,0*	1,0*	1,5*	3,0*

* Valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis.

2.3 Prova de carga estática em estacas

Segundo Fellenius (2023), a prova de carga estática é considerada o método mais direto e confiável para avaliar a capacidade de carga de estacas. Seu objetivo principal é reproduzir, em campo, as condições de carregamento que a estrutura impõe à fundação, aplicando cargas crescentes e monitorando o deslocamento (recalque) da estaca. A NBR-16903 (ABNT, 2020) regulamenta o procedimento de aplicação de carga, os intervalos de leituras e a análise dos dados no Brasil.

O ensaio consiste na aplicação de carga no topo da estaca e o monitoramento dos respectivos recalques. São realizados sucessivos estágios de carregamento até atingir a carga de ensaio, em cada incremento de carga aumenta-se no máximo 20% da carga de trabalho. Para avançar de um estágio de carregamento para o próximo estágio, deve-se certificar que os recalques estejam estabilizados. O recalque é considerado como estabilizado quando a variação entre duas leituras consecutivas for inferior a 5%, sendo que cada estágio tem duração de no mínimo 30 minutos. As leituras dos recalques são

coletadas nos seguintes intervalos, contados após a aplicação da carga: 5 min, 10 min, 15 min e 30 min, caso não ocorra a estabilização em 30 minutos, as leituras seguintes devem ser feitas a cada 15 min até atingir a estabilização com tempo mínimo de 60 minutos e tempo máximo de estágio de 120 min. Se não houver a estabilização do recalque até 120 min, é realizada a leitura de 120 min e, em seguida, avança para o próximo estágio de carregamento.

2.4 Comparações entre métodos semiempíricos e prova de carga

A experiência de projetos nos mostra que as estimativas provenientes de métodos semiempíricos nem sempre coincidem com os ensaios de campo obtidas em provas de carga estática (Alves e Nascimento, 2020). Em solos homogêneos, como areias de mesma compactidade ou argilas de mesma consistência, a precisão costuma ser maior. Já em perfis heterogêneos ou parcialmente saturados, podem surgir discrepâncias consideráveis.

Dessa forma, a comparação entre métodos teóricos e ensaios de campo possibilita identificar as limitações das correlações e ajustar eventuais coeficientes para cada região e tipo de solo. É nesse sentido que se justifica a realização da presente pesquisa, na qual quatro estacas foram dimensionadas por dois métodos conhecidos (Aoki e Velloso e Décourt e Quaresma) e, posteriormente, comparadas a resultados de provas de carga estática.

Eichelberger (2022) observou que, na maioria dos casos, os valores previstos pelos métodos semiempíricos ficaram abaixo dos obtidos experimentalmente. Uma das razões para isso, pode ser o fato de os fatores de correção de tipo de solo usados nos métodos não representarem com exatidão as características dos solos de regiões fora de onde foram obtidos os dados de prova de carga ao qual os métodos se basearam.

Alguns métodos de análises baseados nas curvas de recalques versus carregamento na prova de carga estática nos permitem tecer considerações a respeito das porcentagens suportadas por cada parcela, fuste e ponta. Dentre esses métodos destaca-se o método da rigidez de Decourt, que é apresentado em sequência.

2.5 Método da Rigidez de Décourt

O Método da Rigidez desenvolvido por Décourt (1996, 2008), utiliza a rigidez da estaca, que é a razão entre a carga aplicada no topo da estaca e o

respectivo recalque como parâmetro para se obter dados da estaca como a carga de ruptura, resistência por atrito lateral e de ponta.

Esse método é amplamente utilizado para se obter uma estimativa da mobilização de cargas por atrito lateral e de ponta de provas de carga não instrumentadas.

De acordo com Décourt (1998), a rigidez é definida como a razão entre a carga aplicada à uma fundação e seu respectivo recalque. A rigidez da estaca é calculada para cada estágio de carregamento de acordo com a seguinte equação:

$$RIG = \frac{Q}{s}$$

Onde:

Q : carga aplicada no topo da estaca;

s : recalque correspondente a respectiva carga.

Com os valores de rigidez para cada estágio de carregamento, é possível plotar uma curva da rigidez em função da carga e colocar os dados, dessa mesma curva, para escala logarítmica.

Com a curva $\log(R)$ x $\log(Q)$ é possível distinguir o comportamento da estaca quanto ao domínio do atrito lateral e resistência de ponta.

O ponto onde ocorre essa mudança de comportamento é chamado de ponto de regressão. A partir da definição do ponto de regressão, é possível estimar a carga resistida por atrito lateral e pela ponta.

3 METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido para comparar a capacidade de carga determinada por métodos semiempíricos e pelos resultados de provas de carga estática em quatro estacas, localizadas em duas obras no município de Sinop-MT, denominadas de obras A e B.

3.1 Investigação geotécnica

A investigação do subsolo foi realizada por meio de sondagens de simples reconhecimento com ensaio SPT, em diferentes pontos do terreno, até profundidades que variaram de 30 a 40 metros. Os valores de SPT ao longo do fuste serviram de base para os métodos Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978). Na obra A foram realizados dois furos de sondagem, enquanto na obra B foram executados oito furos de sondagem.

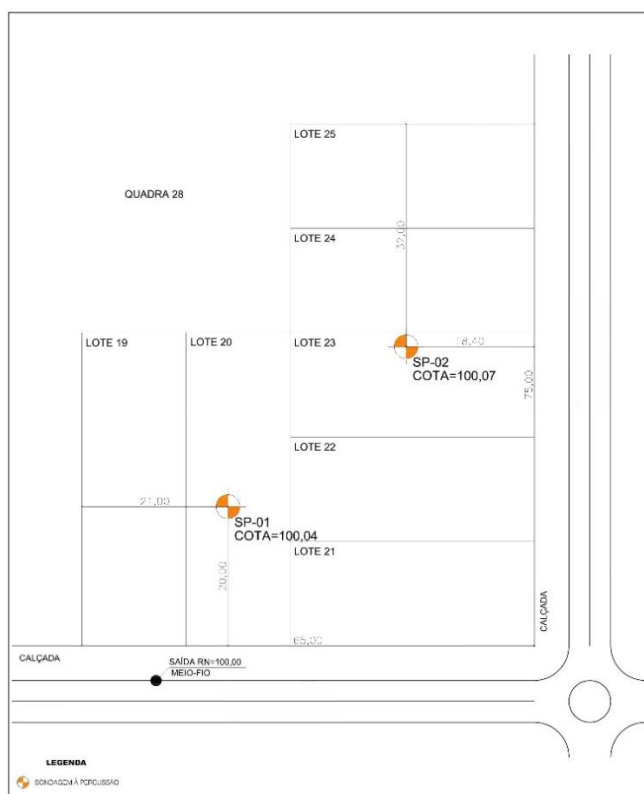


Figura 1 – Locação das sondagens (SPT) da Obra A.

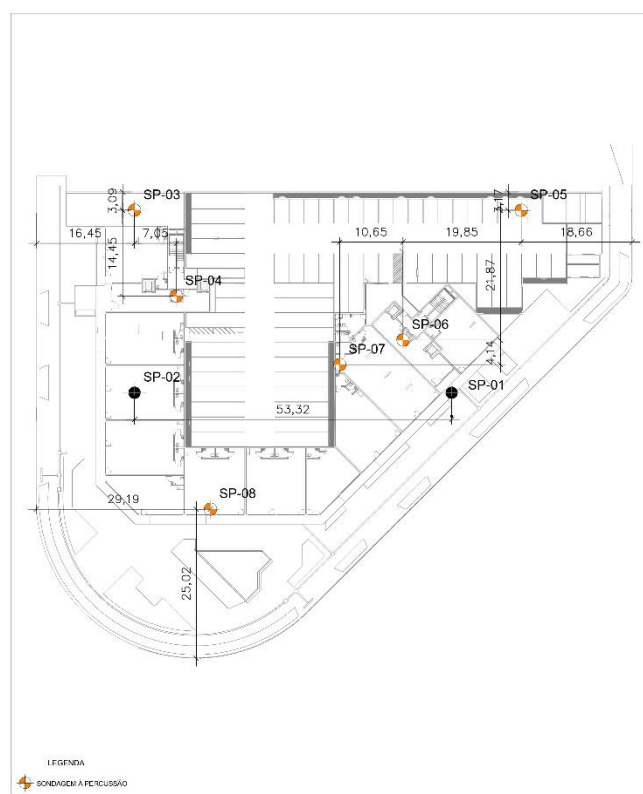


Figura 2 – Locação das sondagens (SPT) da Obra B.

Identificou-se:

Obra A

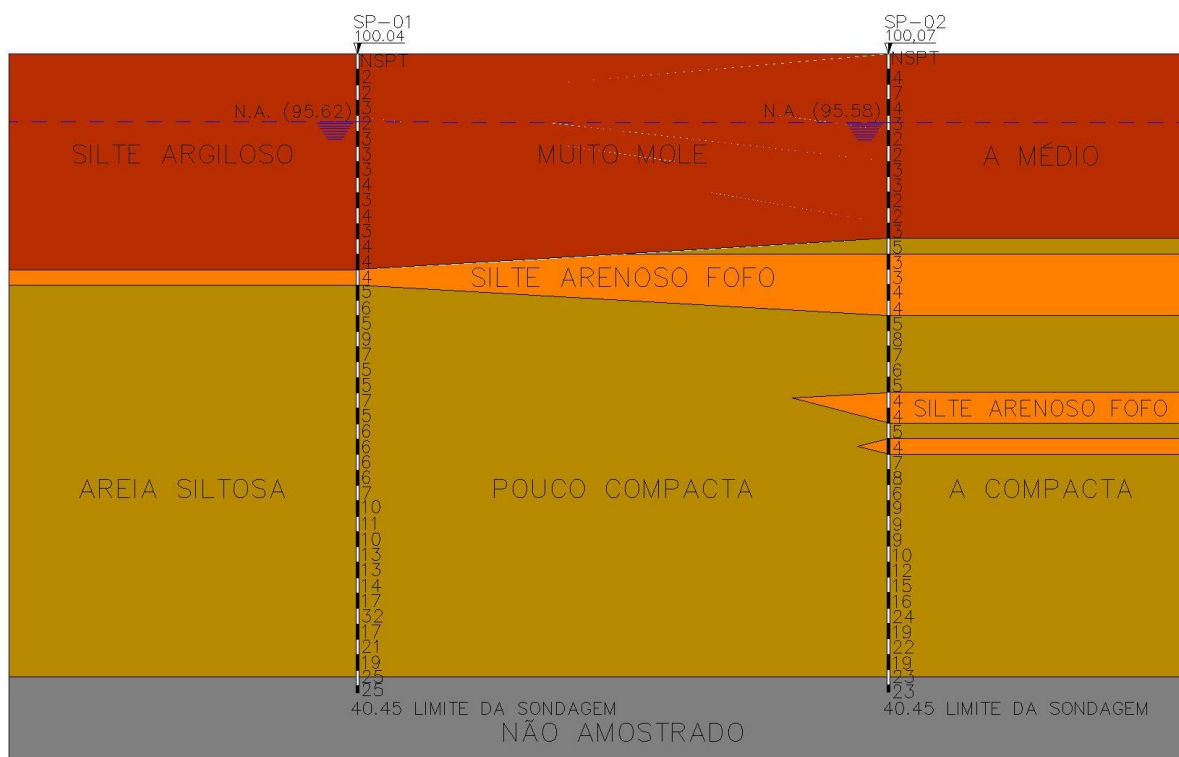


Figura 3 – Perfil geológico (Estacas 1 e 2).

- Camada superficial de silte argiloso, da superfície até cerca de 12 m de profundidade;
- Camada de areia siltosa intercalada com a silte arenoso, a partir de 12 até cerca de 23 m de profundidade;
- A partir de 23 m até atingir a profundidade investigada de 40m foi encontrado somente areia siltosa.

Obra B

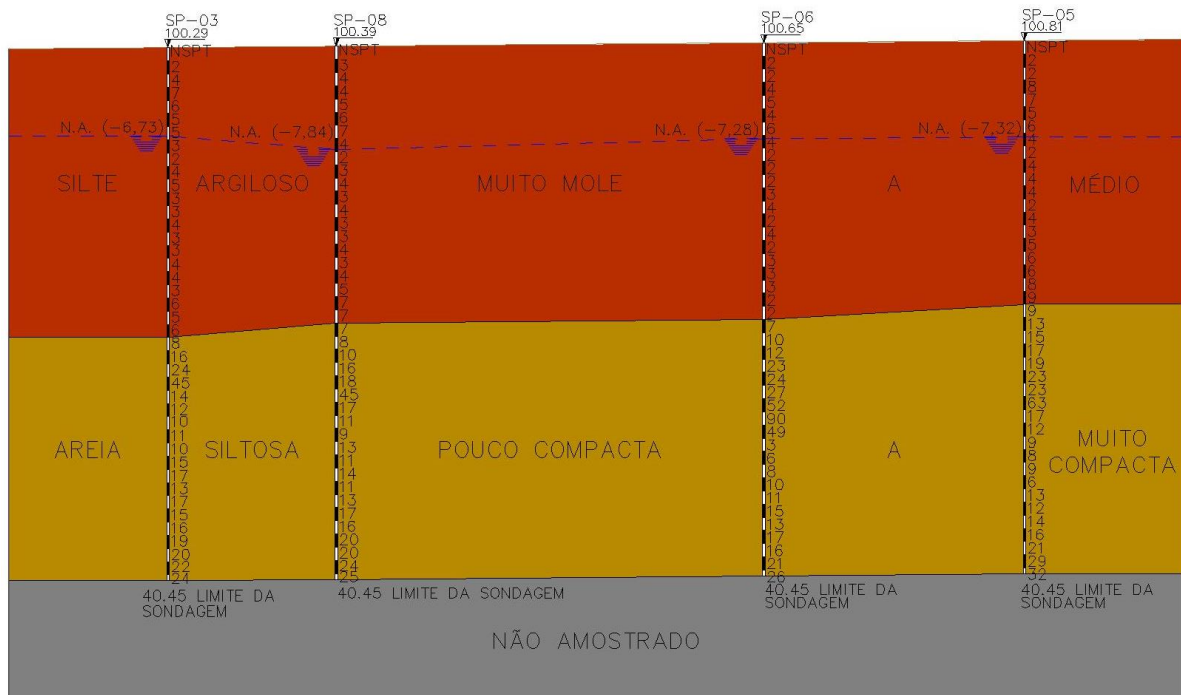


Figura 4 – Perfil geológico (Estacas 3 e 4).

- Camada superficial de silte argiloso, da superfície até cerca de 21m de profundidade;
- Camada de areia siltosa, a partir de 21 m até atingir a profundidade investigada de 40m.
- imediatamente acima e abaixo da ponta da estaca;
- Calculou-se a média do valor de NSPT ao longo do fuste, correlacionado por coeficiente em função do tipo da estaca e do solo, sendo assim possível determinar a resistência por atrito lateral.

3.2 Cálculo pelos métodos semiempíricos

Foram aplicados dois métodos para estimar a capacidade de carga das quatro estacas analisadas:

3.2.1 Aoki e Velloso (1975):

- Determinou-se a resistência de ponta a partir da correlação com o valor de NSPT na ponta da estaca;
- Calculou-se a resistência de fuste somando-se a resistência por atrito lateral correlacionada com o NSPT a cada trecho de 1m.

3.2.2 Décourt e Quaresma (1978):

- Determinou-se a resistência de ponta a partir da correlação com a média do valor de NSPT

3.3 Prova de Carga de Estática

A realização das provas de carga estática seguiu os procedimentos gerais da **NBR 16903** (ABNT, 2020). Quatro estacas foram ensaiadas, duas estacas de diâmetros de 0,60 m e duas estacas de diâmetro 0,80 m. As duas estacas de menor diâmetro tem profundidade 30 m, enquanto as duas de maior diâmetro têm 38 m e 45 m. Abaixo, descrevem-se as principais etapas:

3.3.1 Montagem da Prova de Carga:

- As vigas do sistema de reação foram posicionadas sobre os cavaletes. A fixação

das vigas aos tirantes foi realizada utilizando porcas.

- Abaixo da viga foram posicionados o macaco hidráulico, célula de carga e chapas;
- No bloco sobre a estaca foram posicionados quatro deflectômetros digitais para registrar os recalques;
- Todo o sistema de reação foi coberto com lona para que a luz solar e o vento não interferissem nas leituras dos deflectômetros.

3.3.2 Aplicação de Carga:

- A fase de carregamento é dividida em 10 estágios de incremento de carga. O incremento de cada estágio equivale a 10% da carga de ensaio;
- A carga de ensaio é duas vezes a carga de trabalho da estaca ensaiada;
- A carga deve ser mantida por no mínimo 30 minutos em cada estágio, até a estabilização dos deslocamentos. O tempo máximo para a estabilização é de 2h.
- Se não ocorrer a estabilização dos deslocamentos em até 2h, avança-se para o próximo estágio de carregamento.

3.3.3 Critério de Ruptura:

- Adotou-se como referência o deslocamento igual a 10% do diâmetro da estaca (critério mais usual em provas de carga estática).
- Em nenhuma estaca o recalque alcançou o valor do critério de ruptura, então, fez-se extrapolação com o método de Van der Veen (1953), buscando estimar a carga de ruptura.

3.3.4 Registro de Dados:

- Em cada estágio de carregamento, registravam-se a carga aplicada e o respectivo recalque, resultando numa curva carga $\times$ recalque para posterior plotagem e interpretação.

3.4 Procedimentos de Comparação

Após concluídos os cálculos pelos métodos semiempíricos e as provas de carga, organizou-se uma tabela com a capacidade de carga estimada e a capacidade de carga da prova de carga estática. Na sequência, foram elaborados gráficos de barras para ilustrar as diferenças entre as estacas estudadas, e procedeu-se à discussão dos fatores que poderiam justificar eventuais discrepâncias.

3.5 Separação entre a carga resistida pelo fuste e ponta da estaca pelo Método da Rigidez

Com os dados da carga e o respectivo recalque de cada estágio de carregamento da Prova de Carga Estática, calculou-se a rigidez da estaca. Em posse desses dados, plotou-se uma curva carga $\times$ rigidez.

A rigidez tende a diminuir à medida que se aumenta a carga no topo da estaca. Essa diminuição da rigidez acontece de duas maneiras diferentes, dependendo se a fundação é do tipo que não rompe ou rompe.

Por fundações que não rompem, Décourt (1998) define como aquelas em que a ruptura física não ocorre, na prática. Um exemplo desse tipo de fundação são as estacas escavadas, onde observa-se dois domínios bem definidos na curva de rigidez, o domínio do atrito lateral e o domínio de ponta. No trecho onde o atrito lateral é dominante, apresenta nitidamente uma tendência linear. Já no trecho onde o domínio de ponta é dominante a relação carga $\times$ rigidez é uma curva, que se torna linear em escala logarítmica.

Décourt (1998) define como fundações que rompem aquelas onde a ruptura física pode ocorrer, como as estacas cravadas. A rigidez tende a diminuir de forma linear até a sua ruptura, que teoricamente acontece quando a rigidez é igual a zero ($RIG = 0$), não sendo observado domínios diferentes de mobilização de carga pelo atrito lateral e pela ponta.

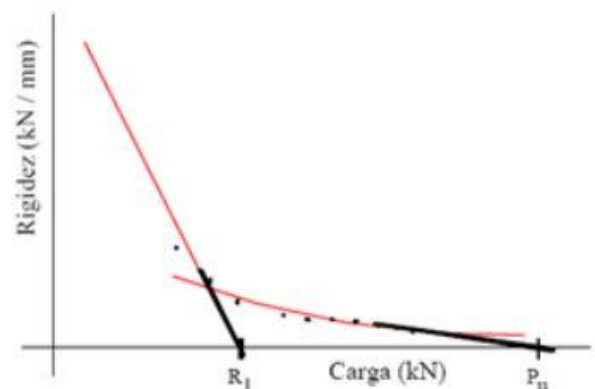


Figura 5 – Exemplo de estacas que não rompem.

Fonte: Campos, 2005, apud Melo *et al.*, 2012

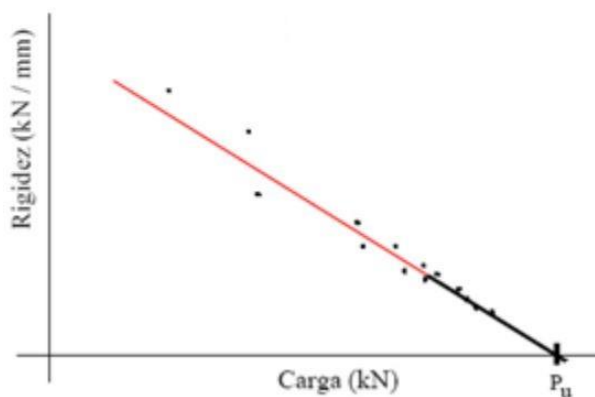


Figura 6 – Exemplo de estacas que rompem.

Fonte: Campos, 2005, apud Melo *et al.*, 2012

As estacas ensaiadas pelas provas de carga estática foram todas do tipo que não rompem, portanto apresentam os dois domínios onde o atrito lateral ou a ponta dominam.

Definida a curva carga x rigidez, a mesma foi plotada em escala logarítmica, obtendo-se, então, a curva $\log(Q)$ x $\log(RIG)$.

Em posse da curva de rigidez, fez-se regressões lineares nos últimos pontos da curva, nos pontos de maiores cargas. As regressões começaram incluindo os pontos de maiores cargas, seguindo em direção aos pontos de carga menor, até encontrar o maior valor de R^2 com o maior número de pontos possível. O último ponto incluído na reta de regressão é conhecido como Ponto de Regressão.

Nesse método encontramos a carga transferida pelo atrito lateral. A carga resistida pela ponta, foi encontrada subtraída da carga total suportada pela estaca.

O Limite Inferior da carga transferida pelo atrito lateral foi encontrado fazendo-se uma regressão linear passando pelo ponto de ruptura convencional da estaca que corresponde a carga aplicada para um recalque de 10% do diâmetro e pelo ponto de regressão. Extrapolou-se a reta até atingir o eixo das cargas. A carga por onde a reta cruza o eixo, é o limite inferior da carga transferida por atrito lateral.

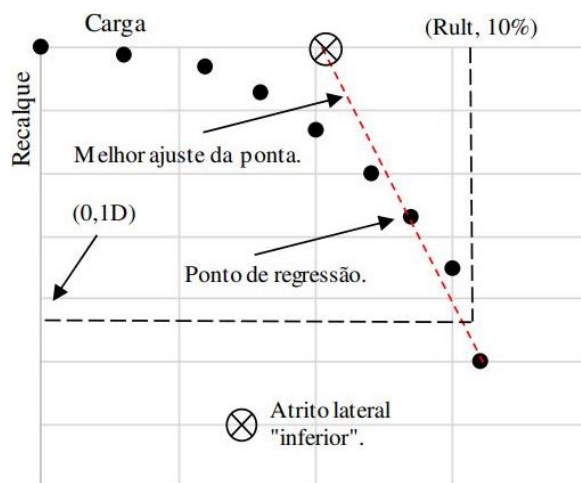


Figura 7 – Definição do limite inferior do atrito lateral. Fonte: Pereira, Darlan & Kormann, Alessandra & Passini, Larissa De Brum, 2016.

O Limite Superior foi encontrado fazendo-se uma regressão linear nos pontos iniciais da curva carga x rigidez, deve-se incluir o maior número de pontos possível com o maior R^2 . A regressão linear incluiu pontos de cargas menores do que a carga de regressão. Pode-se incluir até o ponto imediatamente anterior ao ponto de regressão, utilizando o critério de a reta ter o maior R^2 possível. O valor do Limite Superior é aquele que cruza o eixo das cargas.

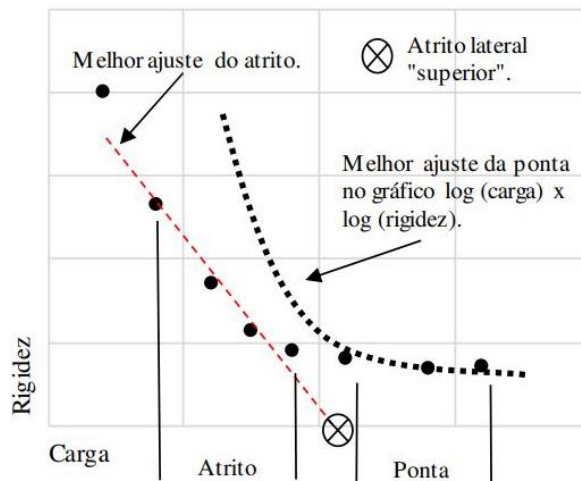


Figura 8 – Definição do limite superior do atrito lateral. Fonte: Pereira, Darlan & Kormann, Alessandra & Passini, Larissa De Brum, 2016.

Depois de encontrados os valores do Limite Inferior e Superior do atrito lateral, fez-se a média dos dois valores. A média é a estimativa de atrito lateral da estaca submetida à Prova de Carga, a resistência de

ponta é obtida subtraindo o atrito lateral da carga resistida pela estaca.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Apresentação dos Resultados das 4 Estacas

A **Tabela 6** resume as características geométricas e o perfil de solo predominante para cada estaca. Já a **Tabela 7** apresenta as capacidades de carga estimadas pelos métodos Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), além dos valores obtidos na prova de carga estática. Pelos métodos semiempíricos foi constatado a mobilização de 40,8% da resistência de ponta.

Tabela 6 – Características das estacas e perfis de solo.

Estaca	Tipo	Diâmetro (cm)	Profundidade (m)	Perfil de Solo
1	Escavada	80	45	Silte argiloso (1–12 m); intercalação de areia siltosa e silte argiloso (12–23 m); areia siltosa (23–40 m)
2	Escavada	80	38	Silte argiloso (1–12 m); intercalação de areia siltosa e silte argiloso (12–23 m); areia siltosa (12–40 m)
3	Hélice contínua monitorada	60	30	Silte argiloso (1–21 m); areia (21–40 m)*
4	Hélice contínua monitorada	60	30	Silte argiloso (1–21 m); areia (21–40 m)*

*Apesar de a camada arenosa estender-se até 40 m, a profundidade das estacas 3 e 4 é 30 m.

Tabela 7 – Capacidade de carga (em tf) pelos métodos semiempíricos e na prova de carga.

Obra	Estaca	Aoki e Velloso	Décourt e Quaresma	Prova de Carga Estática
A	1	620	590	720
	2	450	441	680
B	3	343	299	338
	4	343	299	336

Observa-se, de imediato, que nas estacas de maior profundidade (Estacas 1 e 2), as capacidades obtidas pelos métodos semiempíricos foram inferiores àquelas medidas em campo. Já nas estacas com menor diâmetro e profundidade (Estacas 3 e 4), houve maior convergência

entre a capacidade de carga dos métodos e os valores das provas de carga.

Para ilustrar de forma mais clara a variação dos resultados, foram elaborados gráficos de barras comparando as capacidades de carga em cada método e na prova de carga. Na **Figura 9**, apresentam-se os resultados para as Estacas 1 e 2 e na **Figura 10**, para as Estacas 3 e 4.

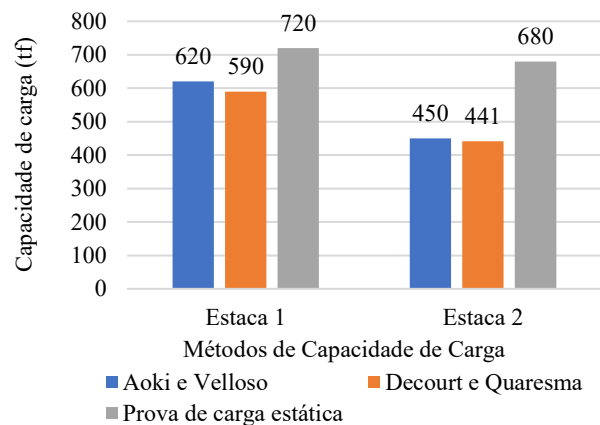


Figura 9 – Comparação de capacidades de carga das estacas (1 e 2).

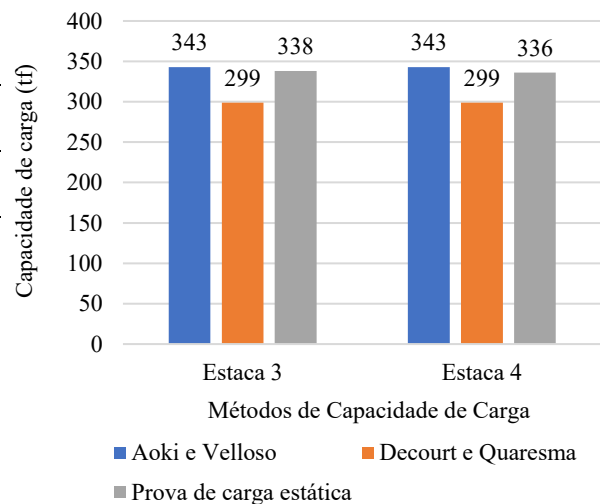


Figura 10 – Comparação de capacidades de carga das estacas (3 e 4).

Foi calculada a diferença percentual da capacidade de carga das estacas entre os métodos semiempíricos e as provas de carga estática, apresentados a seguir:

- **Obra A**

- **Estaca 1**
 - Aoki e Velloso: -13,89%
 - Decourt e Quaresma: -18,06%
- **Estaca 2**
 - Aoki e Velloso: -33,82%
 - Decourt e Quaresma: --35,15%
- **Obra B**
- **Estaca 3**
 - Aoki e Velloso: +1,48%
 - Decourt e Quaresma: -11,54%
- **Estaca 4**
 - Aoki e Velloso: +2,08%
 - Decourt e Quaresma: -11,01%

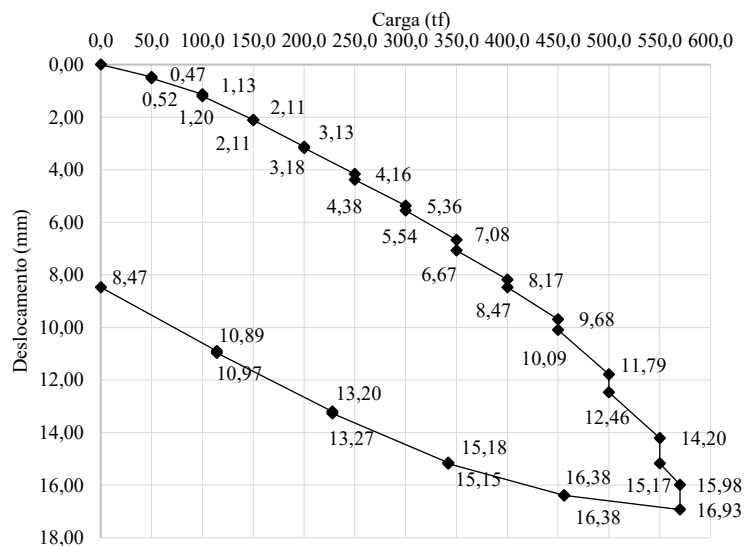


Figura 12 – Curva carga x recalque da Estaca 2.

4.2 Curvas Carga x Recalque

Em posse dos dados obtidos pelas 4 provas de carga, plotou-se a curva carga x recalque de cada estaca ensaiada. As curvas são apresentadas em sequência:

- **Obra A**

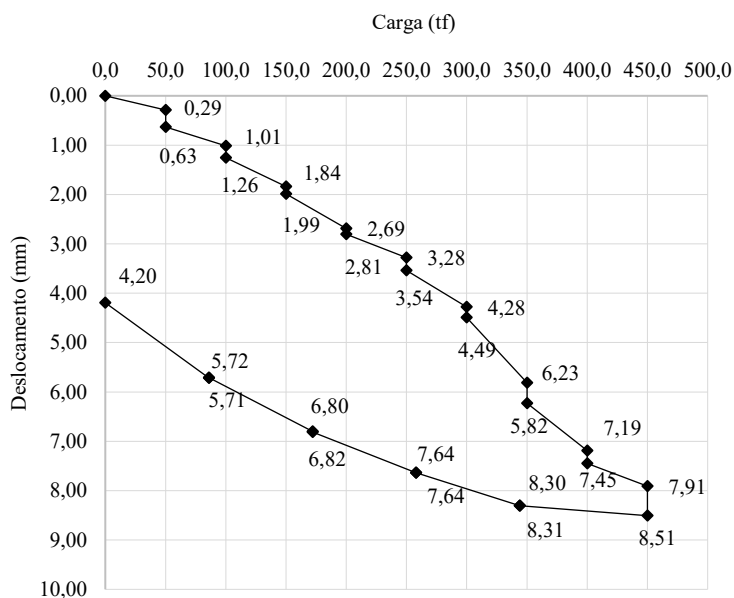


Figura 11 – Curva carga x recalque da Estaca 1.

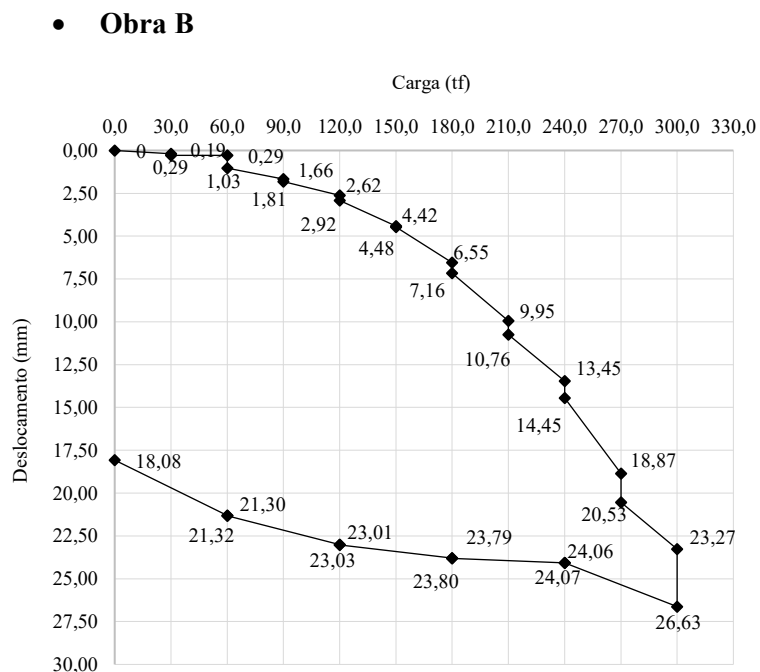


Figura 13 – Curva carga recalque da Estaca 3.

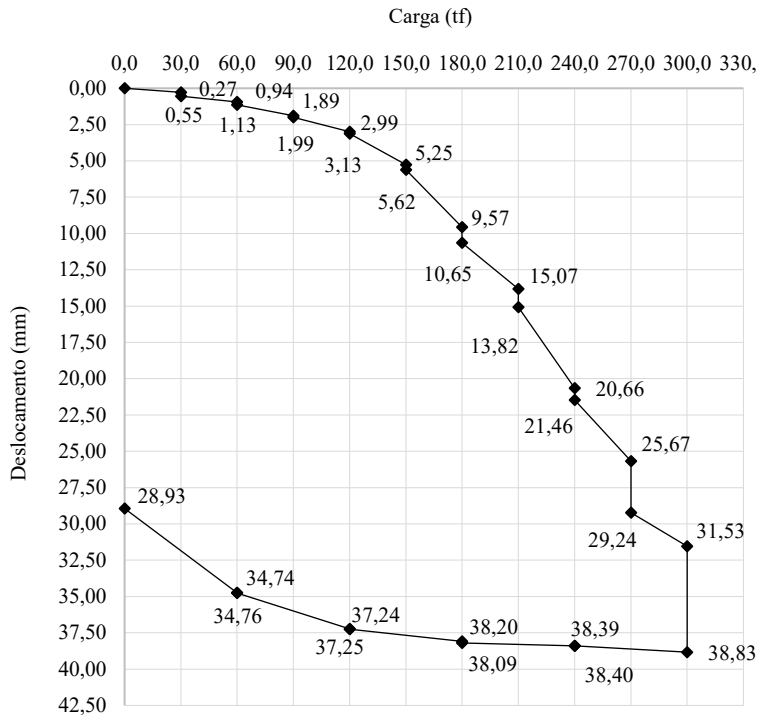


Figura 14 – Curva carga recalque da Estaca 4.

4.3 Transferência de carga ao solo

Com o uso do método da rigidez de Décourt (1996, 2008), estimou-se o percentual de carga transferida ao solo por atrito lateral e resistência de ponta. Dessa forma, foram obtidos os seguintes resultados, apresentados nas figuras 15 e 16:

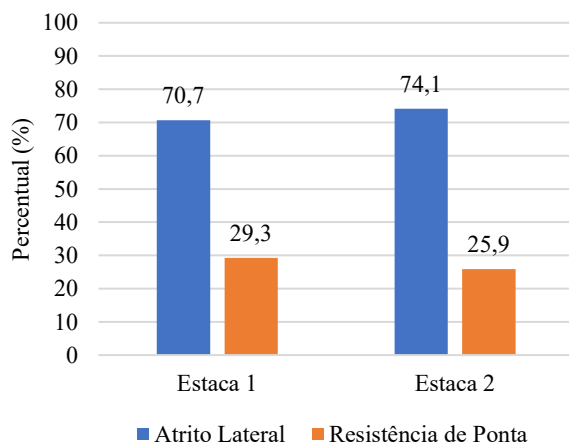


Figura 15 – Transferência de carga pelo atrito lateral e ponta (Estacas 1 e 2).

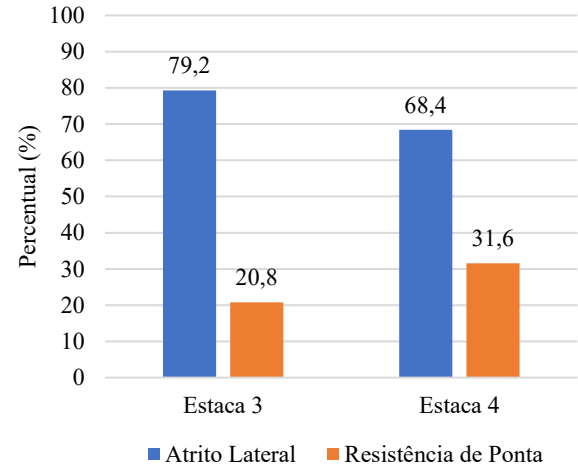


Figura 16 – Transferência de carga pelo atrito lateral e ponta (Estacas 3 e 4).

As análises indicaram uma divergência entre os valores estimados pelos métodos semiempíricos e os resultados de monitoramento in situ das estacas; em linhas gerais, constatou-se a mobilização média de 26,9 % da resistência última de ponta nas estacas avaliadas pelo método da rigidez.

4.4 Discussão dos Resultados

4.4.1 Estacas 1 e 2 (Obra A)

A Estaca 1 (profundidade de 45 m) apresentou capacidade de 720 tf na prova de carga, pelo método de Aoki e Velloso obteve-se 620 tf e no método de Décourt e Quaresma 590 tf. Essa subestimativa pode ser justificada considerando que o SPT, embora seja um ensaio bastante difundido, não fornece informações exatas sobre a capacidade de suporte do solo. Pode-se considerar também que os métodos semiempíricos foram desenvolvidos com base em dados de provas de carga de outras regiões geotécnicas do país, os fatores de correção de tipo de solo podem não representar com fidelidade as características do solo do local estudado.

A Estaca 2, com profundidade de 38 m, obteve 680 tf na prova de carga, ao passo que Aoki e Velloso (450 tf) e Décourt e Quaresma (441 tf) indicaram valores bem menores. Fatores como espessura de camadas de solo diferentes das obtidas no ensaio SPT além de possíveis efeitos de “*setup*” (ganho de resistência ao longo do tempo após a instalação), podem ter influenciado nesse distanciamento dos resultados.

Em ambas as estacas, a transferência de carga ao solo aconteceu predominantemente pelo fuste.

Sendo a parcela de resistência de ponta muito inferior ao atrito lateral.

4.4.2 Estacas 3 e 4 (Obra B)

Já as Estacas 3 e 4 apresentaram resultados próximos dos estimados. Para a Estaca 3, o valor de 343 tf (Aoki e Velloso) e 299 tf (Décourt e Quaresma) se aproximaram bastante de 338 tf da prova de carga.

O mesmo ocorreu com a Estaca 4 (343 tf e 299 tf contra 336 tf da prova de carga). Isso indica que, provavelmente, o perfil geotécnico até 30 m se mostrou mais semelhante ao obtido pela investigação, no local das estacas, e as correlações do SPT refletiram melhor a resistência real do solo.

Além disso, o menor diâmetro (0,6 m) pode ter contribuído para que o comportamento da estaca fosse razoavelmente captado pelos métodos semiempíricos, gerando valores próximos aos medidos em campo. Pois quando os métodos semiempíricos foram desenvolvidos, não era comum o uso de estacas de grande diâmetro.

Nessas estacas, a transferência de carga pelo fuste também foi muito superior à da ponta. Dessa forma todas as estacas analisadas apresentaram esse comportamento de iteração estaca-solo. Isso pode indicar que aumentando-se a carga aplicada nas estacas, poderia haver uma maior transferência de carga para a ponta.

4.4.3 Fatores que Influenciaram a Variação de Valores de Capacidade de Carga

Entre os fatores que podem influenciar a diferença entre métodos semiempíricos e provas de carga, destacam-se:

- **Heterogeneidade do solo:** Camadas de solo podem variar em espessura ao longo de curtas distâncias, não sendo plenamente refletidas em poucas sondagens.
- **Coeficientes dos métodos:** Os valores adotados pelos métodos semiempíricos podem não representar com exatidão o comportamento específico do solo daquela região geotécnica. Pois os métodos semiempíricos foram desenvolvidos com base em resultados de provas de carga de outras regiões do país.
- **Execução e qualidade da estaca:** Se houver variação de diâmetro, falhas construtivas, haverá impacto significativo na mobilização

de atrito lateral e resistência de ponta. Para identificar tais falhas, pode ser realizado um ensaio de integridade da estaca, como o ensaio PIT (*Pile Integrity Test*).

5 CONCLUSÕES

Após analisar os resultados das quatro estacas dimensionadas por métodos semiempíricos e submetidas à prova de carga estática, conclui-se que:

- Os valores obtidos em prova de carga, de modo geral, indicam capacidades maiores do que as estimadas pelos métodos semiempíricos para as estacas 1 e 2. A subestimativa pode ser um aspecto favorável do ponto de vista de segurança, mas representa um possível superdimensionamento em projeto, implicando custos adicionais.
- Nas estacas 3 e 4, houve boa concordância entre as estimativas e a prova de carga, sugerindo que o perfil geotécnico se aproximou do perfil do solo onde as estacas foram executadas, favorecendo a precisão das correlações no cálculo de capacidade de carga.
- O objetivo de comparar métodos semiempíricos e provas de carga estática foi atingido, evidenciando discrepâncias que podem ser ajustadas por meio de fatores de correção específicos para cada condição de solo ou calibrados com base em resultados de campo.
- Recomenda-se, para estudos futuros, ampliar a base de dados com maior número de provas de carga e investigar diferentes tipologias de estacas (cravadas, hélice contínua, pré-moldadas etc.). Como também obter dados de provas de carga instrumentadas. Tais esforços podem proporcionar uma visão mais abrangente do desempenho das fundações em diferentes cenários geotécnicos, bem como auxiliar na calibração de métodos empíricos e semiempíricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, Nascimento. **Análise comparativa entre métodos de determinação da capacidade de carga em estaca raiz e o método interpretativo normalizado dos resultados de**

prova de carga estática. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Cobramseg, 2020.

Aoki, N.; veloso, D. A. **An approximate method to estimate the bearing capacity of piles.** In: Panamerican conference on soil mechanics and foundations engineering, 5., 1975, Buenos Aires. Anais... Buenos Aires, 1975. v. 1.

Associação brasileira de normas técnicas (ABNT). **NBR 6122: Projeto e execução de fundações.** Rio de Janeiro, 2019.

Associação brasileira de normas técnicas (ABNT). **NBR 16903: Execução de prova de carga estática em estacas de fundações.** Rio de Janeiro, 2020.

Décourt, L. (1996) **A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez.** In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE III. São Paulo: ABEF/ABMS, v. 1

Décourt, L. (1998) **Ruptura de fundações e coeficientes de segurança a luz do conceito de rigidez.** In: XI COBRAMSEG, v.3

Décourt, L.(2008) **Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito.** In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE VIII. São Paulo: ABEF/ABMS, v. 1

Décourt, L.; Quaresma, A. R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT.** In: Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações, 6., 1978, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1978. v. 1.

Eichelberger, L. V. **Avaliação da capacidade de carga geotécnica em estacas a partir dos métodos semiempíricos e provas de carga estáticas** / Luiza Eichelberger. - 2022.

Fellenius, B. H. **Basics of foundation design.** 3. ed. [s.l.]: Electronic Edition, 2023.

Melo, Barbara Nardi; Albuquerque, Paulo José Rocha de; Décourt, Luciano; Carvalho, David de. **Análise do atrito lateral em estacas hélice contínua instrumentadas por meio do conceito de rigidez.** In: Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica (Cobramseg), 2012.

Pereira, Darlan & Kormann, Alessandro & Passini, Larissa De Brum. **Aplicação do método da rigidez para estimativa do atrito lateral e**

resistência de ponta em estaca escavada. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Cobramseg, 2016.