



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNO SILVA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA A
PARTIR DE BANCO DE DADOS DE PROVA DE CARGAS BIDIRECIONAIS DE
ESTACAS ESCAVADAS COM ESTABILIZANTES DE FURO**

JUAZEIRO DO NORTE

2026

BRUNO SILVA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA A
PARTIR DE BANCO DE DADOS DE PROVA DE CARGAS BIDIRECIONAIS DE
ESTACAS ESCAVADAS COM ESTABILIZANTES DE FURO**

Trabalho de Conclusão de Curso II,
apresentado ao curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Cariri, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Barbosa de Souza
Neto (UFCA)

Coorientadora: Prof. Dra. Sofia Leão Carvalho
(UFG)

JUAZEIRO DO NORTE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

O48a Oliveira, Bruno Silva.

Avaliação de métodos de previsão da capacidade de carga a partir de banco de dados de prova de cargas bidirecionais de estacas escavadas com estabilizantes de furo / Bruno Silva Oliveira. – 2026.
48 f. : il. color.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, CE, 2026.

Orientador: Prof. Dr. João Barbosa de Souza Neto.
Coorientadora: Profa. Dra. Sofia Leão Carvalho.

1. Engenharia civil. 2. Geotecnia - Fundações profundas. 3. Estacas escavadas - Capacidade de carga. 4. Prova de carga bidirecional. 5. Métodos semiempíricos.
I. Souza Neto, João Barbosa de (Orient.). II. Carvalho, Sofia Leão (Coorient.).
III. Universidade Federal do Cariri. IV. Título.

CDD 624.151



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

***Avaliação de Métodos de Previsão da
Capacidade de Carga a Partir de Banco de
Dados de Prova de Cargas Bidirecionais de Estacas Escavadas com
Estabilizantes de Furo***

Bruno Silva Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil do Centro de Ciências e
Tecnologia da Universidade Federal do
Cariri, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil. Área de
concentração: Engenharia Civil.

Aprovada em 7 de abril de 2026.

Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente
JOAO BARBOSA DE SOUZA NETO
Data: 08/04/2026 12:32:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Barbosa de Souza Neto
Orientador(a)



Documento assinado digitalmente
SOFIA LEAO CARVALHO
Data: 08/04/2026 17:14:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sofia Leão Carvalho
Coorientadora

**PALOMA MOREIRA DE
MEDEIROS:60001363
310**

Assinado de forma digital por
PALOMA MOREIRA DE
MEDEIROS:60001363310
Dados: 2026.04.09 07:21:09 -03'00'

Profª. Me. Palome Moreira de Medeiros
1º membro examinador

*À memória do meu avô Elizon, que
não pôde ver o fim desta trajetória,
mas permanece vivo em meu
coração.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o apoio, incentivo e pelos valores que sempre me transmitiram ao longo da vida, sendo fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Em especial, à minha mãe, Eliane, por todo o incentivo desde o momento em que soube do meu ingresso no curso de Engenharia Civil. Seu apoio constante, sua dedicação e sua confiança foram essenciais em cada etapa dessa trajetória, especialmente nos momentos mais desafiadores. Sem ela, nada disso seria possível.

Aos meus familiares, que sempre estiveram presentes ao longo de toda a minha trajetória, oferecendo apoio, compreensão e incentivo nos momentos mais desafiadores. Sou grato por cada palavra de encorajamento e por terem torcido e vibrado a cada uma das minhas conquistas.

Aos meus colegas de turma, com quem tive a oportunidade de compartilhar não apenas os desafios acadêmicos, mas também momentos de aprendizado, parceria e amizade, tornando essa caminhada mais leve, enriquecedora e significativa. Em especial, agradeço aos meus amigos Aretha, Geraldo e João, cuja maior proximidade foi essencial ao longo de toda essa trajetória, contribuindo tornar cada conquista ainda mais especial.

Bem como ao meu companheiro, Samuel, que, com seu apoio e incentivo constantes, esteve ao meu lado em todos os momentos, sendo fundamental para que eu pudesse seguir em frente e concluir esta etapa. Além disso, seu humor duvidoso foi essencial para tornar os dias mais leves, arrancando risadas até nos momentos mais difíceis.

À minha professora e orientadora, Sofia, a quem admiro desde a primeira aula, por toda a dedicação, paciência e comprometimento ao longo deste trabalho. Desde o início, sua orientação cuidadosa e seu apoio constante foram fundamentais para conduzir este TCC com segurança, contribuindo significativamente para o seu desenvolvimento e conclusão.

À UFCA e a todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, contribuindo de maneira significativa para o meu aprendizado e crescimento ao longo do curso. Sou grato pelos conhecimentos compartilhados, pela dedicação ao ensino e pelo papel fundamental que desempenharam na construção da minha trajetória pessoal e profissional.

RESUMO

O presente trabalho aborda a avaliação da capacidade de carga de estacas a partir da comparação entre valores previstos por métodos semiempíricos e resultados obtidos em provas de carga com célula bidirecional, destacando as particularidades desse tipo de ensaio e suas implicações na interpretação dos mecanismos resistentes de fuste e ponta. A motivação do estudo está relacionada à necessidade de compreender melhor a aplicabilidade e as limitações dos métodos de previsão amplamente utilizados na prática de engenharia geotécnica, bem como à busca por maior confiabilidade e eficiência no dimensionamento de fundações profundas. Como objetivo, pretendeu-se analisar o desempenho dos métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978, 1996), por meio da comparação com dados experimentais, além de investigar a influência de fatores como posicionamento da célula, mobilização das parcelas resistentes e critérios normativos. A metodologia envolveu o tratamento e filtragem de um banco de dados de provas de carga, aplicação dos métodos de previsão em planilhas previamente calibradas e análise estatística dos resultados, incluindo o uso de *boxplots* para avaliação da dispersão dos dados. Os resultados indicaram melhor desempenho global do método de Décourt-Quaresma na estimativa da carga total, embora ambos os métodos tenham apresentado discrepâncias na avaliação isolada das parcelas de fuste e ponta, que tendem a se compensar. Verificou-se ainda a importância da correta interpretação dos ensaios bidirecionais, especialmente quanto à posição da célula e à mobilização antecipada da ponta. Conclui-se que, apesar das limitações observadas, os métodos analisados apresentam desempenho satisfatório para estimativa da carga total, sendo fundamental a análise crítica dos resultados e a consideração das condições reais de campo para um dimensionamento mais seguro e econômico.

Palavras-chave: Prova de carga estática. Métodos de previsão de capacidade de carga. Estacas escavadas com fluido estabilizante. Célula bidirecional

ABSTRACT

The present study addresses the evaluation of the load-bearing capacity of piles through the comparison between values predicted by semi-empirical methods and results obtained from bidirectional load tests, highlighting the particularities of this type of test and its implications for the interpretation of shaft and base resistance mechanisms. The motivation for this study is related to the need for a better understanding of the applicability and limitations of prediction methods widely used in geotechnical engineering practice, as well as the pursuit of greater reliability and efficiency in the design of deep foundations. The objective was to analyze the performance of the Aoki-Velloso (1975) and Décourt-Quaresma (1978, 1996) methods by comparing them with experimental data, in addition to investigating the influence of factors such as cell position, resistance mobilization, and normative criteria. The methodology involved the treatment and filtering of a database of load tests, the application of prediction methods in previously calibrated spreadsheets, and statistical analysis of the results, including the use of boxplots to assess data dispersion. The results indicated a better overall performance of the Décourt-Quaresma method in estimating total load, although both methods showed discrepancies in the isolated evaluation of shaft and base resistances, which tend to compensate each other. It was also observed the importance of properly interpreting bidirectional load tests, especially regarding the position of the cell and the premature mobilization of base resistance. It is concluded that, despite the observed limitations, the analyzed methods present satisfactory performance for estimating total load, and that a critical analysis of results along with consideration of actual field conditions is essential for a safer and more economical design.

Keywords: Static load test. Bidirectional cell. Bearing capacity prediction methods. Bored piles with stabilizing fluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Foto de instalação de camisa metálica em furo de estaca	4
Figura 2.2 – Exemplo de estação escavado com lama betonítica.....	5
Figura 2.3 – Caixaão de reação	7
Figura 2.4 – Viga metálica e estacas de reação	7
Figura 2.5 - Tirantes de reação	7
Figura 2.6 - Estaca escavada com célula bidirecional	8
Figura 2.7 - Detalhe das células expansivas fixadas na armação da estaca.....	9
Figura 2.8 – Ilustração de resultado típico de ensaio bidirecional	9
Figura 2.9 – Instrumentação típica utilizando <i>strain-gages e tell-tales</i> em estaca.....	11
Figura 3.1 - Exemplo de curva carga × recalque da parcela de ponta.....	17
Figura 3.2 - Exemplo de curva carga × recalque da parcela de fuste	18
Figura 3.3 - Esquema de carga na PCEB: a) com carga fornecida pelo ensaio; b) com carga de fuste e ponta recalculadas	18
Figura 3.4 - Gráfico de dispersão dos fatores de segurança para carga de ponta do método de Aoki-Velloso (1975)	21
Figura 4.1 – Parâmetros geométricos da análise do banco de dados.....	23
Figura 4.2 - Boxplot dos dados de comprimento de ponta, fuste e total	24
Figura 4.3 – Boxplot dos dados da relação percentual entre comprimento total e comprimento de ponta	24
Figura 4.4 – <i>Boxplot</i> dos diâmetros das estacas	25
Figura 4.5 - <i>Boxplot</i> do carregamento máximo aplicado na estaca	25
Figura 4.6- Percentual de valores aceitáveis, contra e a favor da segurança do método de Aoki-Velloso (1975)	26
Figura 4.7 - Distribuição dos resultados do método de Aoki-Velloso (1975) em relação à razão de segurança de carga aplicada no método e do medido na prova de carga	26
Figura 4.8- Percentual de valores aceitáveis, contra e a favor da segurança pelo método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)	28

Figura 4.9 - Distribuição dos resultados do método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)	
.....	28
Figura 4.10 – Percentual dos fatores de segurança recalculados para resistência total	30
Figura 4.11 – <i>Boxplot</i> dos fatores de segurança recalculados	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de instrumentação e seus respectivos princípios de funcionamento.....	11
Tabela 2.2 - Coeficientes k e α para o método Aoki e Velloso (1975)	13
Tabela 2.3 - Valores de F_1 e F_2 do método Aoki-Velloso (1975)	13
Tabela 2.4 - Valores de α do método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)	14
Tabela 2.5 - Valores de β do método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)	14
Tabela 2.6 - Valores do coeficiente de resistência de ponta em função do solo.....	15

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
ELU	Estado de Limite Último
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PCE	Prova de Carga Estática
PCEB	Prova de Carga Bidirecional
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral	2
1.2	Objetivos Específicos.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Fundação profunda: estacas escavadas	3
2.1.1	<i>Estabilizantes de furo</i>	<i>3</i>
2.2	Tipos de prova de carga	5
2.2.1	<i>Provas de carga convencionais em estacas</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Provas de carga bidirecionais em estacas.....</i>	<i>7</i>
2.2.3	<i>Instrumentação de estacas</i>	<i>10</i>
2.3	Métodos de previsão de capacidade de carga em estacas	12
2.3.1	<i>Aoki e Velloso (1975)</i>	<i>12</i>
2.3.2	<i>Décourt e Quaresma (1978, 1996)</i>	<i>14</i>
3	METODOLOGIA.....	16
3.1	Banco de dados	16
3.2	Tratamento das provas de carga	16
3.3	Comparação entre valores previstos e medidos.....	20
3.4	Cálculo alternativo para carga última da estaca	21
4	RESULTADOS.....	23
4.1	Análise estatística do banco de dados	23
4.1.1	<i>Comprimento</i>	<i>23</i>
4.1.2	<i>Diâmetro</i>	<i>24</i>
4.1.3	<i>Carregamento</i>	<i>25</i>
4.2	Avaliação dos métodos Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978)	26
4.3	Cálculo alternativo para a carga última da estaca	29

5 CONCLUSÃO.....	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

As fundações são elementos estruturais fundamentais para a estabilidade e segurança das edificações, tendo como função primordial a transmissão das cargas provenientes da superestrutura para as camadas mais resistentes do solo. Entre os diversos tipos de fundações profundas, as estacas destacam-se pela ampla utilização em obras de médio e grande porte no Brasil, especialmente devido à sua adaptabilidade a diferentes tipos de solo e a eficiência estrutural que oferecem.

O adequado dimensionamento das fundações depende de investigações geotécnicas e de métodos que permitam prever, de forma segura, a capacidade de carga das estacas. Nesse contexto, o ensaio de sondagem à percussão SPT (*Standard Penetration Test*) é o procedimento de investigação geotécnica mais difundido no país, devido à sua simplicidade de execução, baixo custo e extenso banco de dados acumulado ao longo das décadas.

Entretanto, as previsões de capacidade de carga obtidas por métodos semiempíricos baseados no SPT podem apresentar divergências em relação ao comportamento real das estacas em campo. Para reduzir essas incertezas, os ensaios de prova de carga estática (PCE) constituem a principal ferramenta de validação, permitindo avaliar de maneira direta a resposta do sistema estaca-solo. Entre as técnicas mais recentes aplicadas no Brasil, a utilização da célula bidirecional possibilita a realização de ensaios mais práticos, eficientes e seguros.

No cenário nacional, destacam-se dois métodos de previsão de capacidade de carga bastante consolidados: o método Aoki-Velloso (1975), que considera correlações entre os valores de N_{SPT} (número de golpes da camada) e o tipo de solo, e o método Décourt-Quaresma (1978-1996), que leva em conta a resistência de ponta e lateral estimada a partir dos resultados da sondagem. Ambos os métodos são amplamente empregados por projetistas, embora apresentem algumas divergências quando comparados com os resultados experimentais de provas de carga, devido a uma série de fatores como regionalização e limitação de características geométricas e geotécnicas relacionadas aos bancos de dados.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar os métodos clássicos brasileiros de previsão de carga em estacas a partir de um banco de dados contendo estacas escavadas com fluido estabilizante executadas nas regiões Sul e Sudeste que foram ensaiadas com uma prova de carga com célula bidirecional. O intuito é comparar esses métodos quanto à previsão separada entre fuste e ponta da estaca.

Esse banco de dados é uma continuidade do banco de dados levantado por Carvalho (2024), em sua tese intitulada “Previsão da capacidade de carga de estacas hélice contínuas por meio de Redes Neurais Artificiais”.

O banco de dados utilizado foi disponibilizado pela empresa Arcos Engenharia de Solos, reunindo resultados de provas de carga estática com célula bidirecional de estacas escavadas com estabilizante de furo, bem como informações obtidas por sondagens SPT. Além de viabilizar a comparação entre os métodos empíricos de previsão e os resultados experimentais, este banco de dados também possibilita um estudo das características das estacas que podem contribuir para a resistência última da estaca em sua ponta e fuste.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho dos métodos brasileiros de previsão de capacidade de carga total, do fuste e da ponta de estacas escavadas, em especial os métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978, 1996), a partir da análise de um banco de dados composto por resultados de provas de carga estática com célula bidirecional e sondagens SPT.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma análise estatística do banco de dados, buscando identificar tendências, dispersões e correlações que permitam avaliar a precisão e a confiabilidade dos métodos;
- Aplicar os métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978, 1996) para estimar a capacidade de carga das estacas presentes no banco de dados;
- Comparar os resultados obtidos pelos métodos semiempíricos com os valores medidos experimentalmente nas provas de carga bidirecionais;
- Discutir as vantagens, limitações e aplicabilidade dos métodos de previsão estudados, contribuindo para o aprimoramento do dimensionamento de fundações em um contexto regional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundação profunda: estacas escavadas

A fundação do tipo profunda consiste em uma estrutura responsável por receber as cargas da superestrutura e transmitir ao solo, pela resistência de ponta e de fuste. De acordo com a ABNT NBR 6122 (2022), para ser considerada profunda, a fundação deve ter a base em uma profundidade superior a oito vezes a menor dimensão da seção transversal, sendo o mínimo 3,0 metros. Os principais tipos são estacas e tubulões.

Danziger e Lopes, (2022) definem que as estacas podem ser classificadas tanto pelo material quanto pelo método de execução. Quanto ao material, as mais comuns são as de aço e concreto. As de madeira, muito usadas no passado, hoje aparecem apenas em obras provisórias. Para as estacas de concreto, têm-se dois tipos: estacas pré-moldadas, fabricadas antes da instalação, e estacas moldadas *in loco*, produzidas diretamente no terreno. Além disso, existem as chamadas mistas, que combinam aço e concreto no mesmo elemento.

O autor ainda destaca que quanto ao processo executivo, as estacas se dividem em dois grandes grupos:

- Estacas cravadas (ou de deslocamento), em que o solo não é retirado, mas sim empurrado lateralmente e para a ponta;
- Estacas escavadas (ou de substituição), em que o solo é escavado e substituído pelo concreto.

As estacas escavadas são moldadas *in loco* após a retirada do solo e permitem grande flexibilidade de diâmetro e profundidade. Esse tipo de estaca tem a vantagem de gerar menos vibração e ruído durante a execução, o que a torna muito indicada para obras em áreas urbanas ou próximas a edificações sensíveis

No Brasil o projeto e execução de estacas é normatizado pela ABNT NBR 6122 (2022), que estabelece critérios técnicos para o dimensionamento, execução e controle de qualidade das fundações profundas.

2.1.1 Estabilizantes de furo

Segundo Vellozo e Lopes (2011), as escavações de estacas podem ser realizadas com ou sem a necessidade de suporte das paredes. Quando o solo apresenta boa estabilidade, é possível executar a perfuração sem contenção. Porém, em condições menos favoráveis, torna-se

indispensável a utilização de estabilizantes para evitar o colapso das paredes do furo. Esse suporte pode ser garantido por meio de encamisamento metálico que avança junto com a ferramenta de escavação. A Figura 2.1 mostra um exemplo de execução de instalação de camisa metálica em estaca.

Figura 2.1 – Foto de instalação de camisa metálica em furo de estaca



Fonte: Site Solo Net (S.d.)

Outra alternativa é a aplicação de fluidos estabilizantes, como a lama bentonítica ou polímeros, que atuam formando uma película nas paredes da escavação e conferindo estabilidade contra desmoronamentos, principalmente em solos arenosos ou quando há a presença do lençol freático.

2.1.1.1 Fluido à base de lama bentonítica

Nienov (2016), define que a lama bentonítica é produzida a partir da mistura de água com bentonita, composta, principalmente, pelo argilo mineral montmorilonita sódica. Durante a circulação dentro do furo, a suspensão cria uma película protetora sobre as paredes, diminuindo a infiltração de água e estabilizando o solo.

Além de suportar as paredes, a lama bentonítica contribui para a remoção de detritos durante a escavação. Sua ampla utilização no Brasil se deve ao baixo custo e à eficiência, especialmente em solos arenosos ou instáveis. No entanto, exige cuidados especiais no manejo: a lama precisa ser preparada, reciclada e descartada corretamente, sob risco de causar impactos

ambientais e aumentar o custo final da obra. A Figura 2.2 apresenta um exemplo de estaca com lama bentonítica.

Figura 2.2 – Exemplo de estação escavado com lama bentonítica



Fonte: Site Paraná Fundações (S.d.)

2.1.1.2 Fluido à base de polímero

As soluções poliméricas foram introduzidas como uma alternativa mais recente à lama bentonítica. Quando dissolvidos em água, os polímeros formam uma solução de baixa viscosidade que estabiliza o furo ao interagir com as partículas do solo. Diferente da lama bentonítica, os polímeros não geram grande volume de resíduos, o que reduz custos de descarte e impactos ambientais (Nienov, 2016).

Além disso, permitem melhor limpeza do furo, proporcionando uma interface mais adequada entre o concreto e o solo, resultando em maior qualidade da estaca quanto ao atrito. Entretanto, sua aplicação ainda é pouco difundida no Brasil, embora apresente vantagens em obras que demandam maior eficiência e sustentabilidade.

2.2 Tipos de prova de carga

2.2.1 Provas de carga convencionais em estacas

O ensaio de prova de carga estática (PCE) é o método mais confiável para determinar a real capacidade de carga de estacas, pois permite estimar um valor mais condizente com a realidade em comparação com métodos empíricos e semiempíricos baseados em correlações de campo ou fórmulas teóricas.

Esse ensaio consiste em submeter a estaca à esforços controlados, por meio da aplicação de cargas verticais crescentes, e registrar os deslocamentos correspondentes, possibilitando a obtenção da curva carga x recalque. No Brasil, é regulamento pelas normas ABNT NBR 16903 (2020) e ABNT NBR 6489 (2019) que tratam sobre prova de carga estática em fundação profunda e prova de carga estática em fundação direta, respectivamente.

Segundo a ABNT NBR 16903 (2020), a prova de carga estática pode ser realizada tanto à compressão quanto à tração e em esforços horizontais, sendo mais comum a aplicação de cargas verticais de compressão. O ensaio tem como principal objetivo verificar a segurança do projeto de fundações profundas, confirmar a capacidade de carga admissível e avaliar o comportamento da estaca no solo em relação às cargas aplicadas e à sua deformação.

Diferentemente das estimativas obtidas a partir de métodos empíricos que utilizam ensaios de sondagem (SPT ou CPT), a PCE permite observar diretamente o desempenho da estaca em condições reais de carregamento. Assim, ela é utilizada como parâmetro de projeto, servindo também como referência para validação de métodos de previsão da capacidade de carga e parâmetro de análises numéricas e em métodos indiretos de estimativa.

Vários autores ressaltam que a prova de carga estática é a forma mais confiável de avaliar o desempenho das fundações, mesmo sendo um ensaio mais caro e de execução mais complexa (Alonso, 2015; Vellozo; Lopes, 2011). Abrir mão desse ensaio significa confiar apenas nos cálculos de projeto, o que pode deixar o resultado menos preciso (Cintra et al., 2014).

Ainda assim, sua realização é fortemente indicada em obras de médio e grande porte, que exigem alto nível de segurança estrutural, ou em situações em que o solo apresenta características mais complexas e difíceis de se prever.

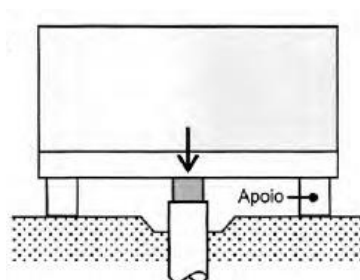
Em termos práticos, o ensaio pode ser realizado pelos métodos de carregamento lento, rápido, misto e cíclico sendo o primeiro mais tradicional e normatizado no Brasil. A análise dos resultados é feita por meio da interpretação da curva carga x recalque, considerando critérios de ruptura, deslocamento admissível e extrapolação de carga última, quando necessário.

Para a realização do ensaio PCE, é montada uma estrutura composta por um macaco hidráulico e um sistema de reação, que pode ser de três tipos:

- Uma plataforma com um caixão contendo algum material pesado (Figura 2.3).
- Vigas presas a estacas vizinhas à de prova que serão tracionadas (Figura 2.4).

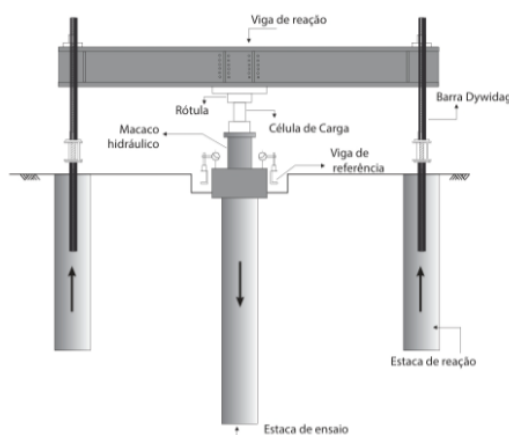
- Vigas presas a tirantes instalados tal qual ao sistema anterior (Figura 2.5).

Figura 2.3 – Caixaõ de reação



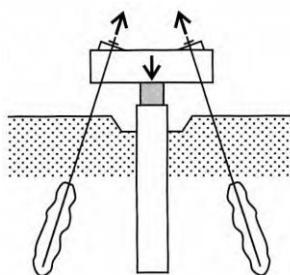
Fonte: Vellozo; Lopes, (2011)

Figura 2.4 – Viga metálica e estacas de reação



Fonte: Cintra et al. (2014)

Figura 2.5 - Tirantes de reação



Fonte: Vellozo; Lopes, (2011)

2.2.2 Provas de carga bidirecionais em estacas

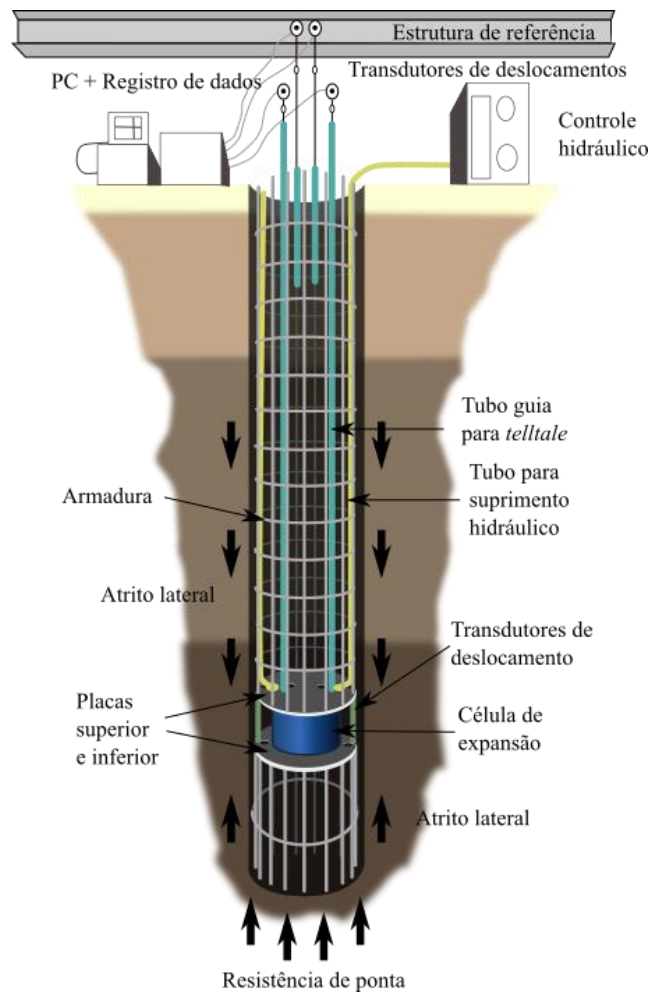
Um método alternativo à PCE é a prova de carga bidirecional (PCEB) que introduz uma ou mais células hidráulicas expansivas (*expancells*, ou *O-cells*) no fuste, próximo a ponta da estaca, que ao serem acionadas, carregam a parte inferior em compressão para baixo e a parte superior para cima, como um elemento tracionado, sem haver a necessidade de sistemas de

reação.

Esse método foi desenvolvido inicialmente pelo brasileiro Silva (1986) e, posteriormente, patenteado e amplamente divulgado por Osterberg (1989), conforme Fellenius (2019). No Brasil, a empresa Arcos Engenharia de Solos se destaca como especialista nesse tipo de ensaio.

A instalação da célula, no entanto, deve ser em um local em que a parte superior e a parte inferior cheguem à ruptura ao mesmo tempo. A célula consiste basicamente em um sistema preenchido com água, que ao receber pressão se expande gerando um deslocamento nas duas partes da estaca com a mesma hidrostática. Esse movimento é medido a partir de instrumentos consolidados a armação das estacas moldadas *in loco*, que serão abordados no item 2.2.3 (Dada, 2019). As Figura 2.6 e Figura 2.7 apresentam uma representação da prova de carga bidirecional e um exemplo real de instalação das células expansivas, respectivamente.

Figura 2.6 - Estaca escavada com célula bidirecional



Fonte: Fellenius (2019), traduzido por Carvalho (2024)

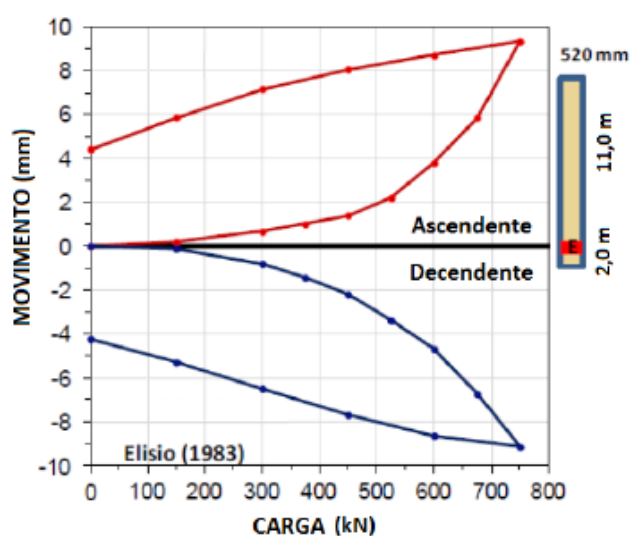
Figura 2.7 - Detalhe das células expansivas fixadas na armação da estaca



Fonte: Imagem cedida pela empresa Arcos Engenharia de Solos

O ensaio bidirecional fornece duas curvas carga-deslocamento. Uma com medidas de deslocamento ascendente do trecho superior da estaca (valores positivos) e outra com medidas de deslocamento do trecho inferior (valores negativos). Quando a célula está localizada muito próxima da ponta da estaca, pode-se considerar o deslocamento observado igual ao da ponta. Porém, o mais indicado é instalar um instrumento de medição de recalque junto a ponta, possibilitando uma avaliação mais confiável do carregamento da estaca sob carga. A Figura 2.8 mostra um resultado típico de um ensaio bidirecional.

Figura 2.8 – Ilustração de resultado típico de ensaio bidirecional



Fonte: Adaptado por Dada (2019) de Fellenius (2019)

Cabe destacar uma limitação importante da prova de carga com célula bidirecional relacionada à posição da célula quando instalada próxima à ponta da estaca. Nessa

configuração, o ensaio pode exigir a mobilização da resistência de ponta de forma antecipada, já que a carga é aplicada a partir do fuste, em sentidos opostos.

Na prática, sob carregamentos convencionais, a transferência de carga ocorre de cima para baixo, com a mobilização do atrito lateral ao longo do fuste acontecendo, em geral, antes da mobilização plena da ponta. Dessa forma, a posição da célula muito próxima à base pode levar a uma representação pouco fiel do comportamento real da estaca, antecipando um mecanismo resistente que, em campo, tenderia a ocorrer de forma mais gradual ou apenas nas etapas finais do carregamento.

2.2.3 Instrumentação de estacas

A prova de carga convencional permite apenas conhecer os deslocamentos e a carga aplicada no topo da estaca. Assim, essa limitação impede compreender como a carga é distribuída ao longo de sua profundidade. De acordo com Carvalho (2024), a instrumentação das estacas possibilita avaliar a transferência de carga ao longo do fuste e da ponta, permitindo identificar de que forma a carga aplicada é mobilizada lateralmente e na base. Essa análise é especialmente importante, pois sabe-se que a carga é inicialmente mobilizada próxima ao ponto de aplicação, geralmente no fuste, e, posteriormente, distribuída ao longo da estaca, variando conforme o tipo de estaca e as características do perfil de solo.

Existem diversos instrumentos utilizados para a verificação dos deslocamentos em estacas, entre os quais se destacam os extensômetros elétricos (*strain-gages*), os medidores de deslocamento em profundidade, conhecidos como *tell-tales*, além de sistemas de corda vibrante e de fibra óptica.

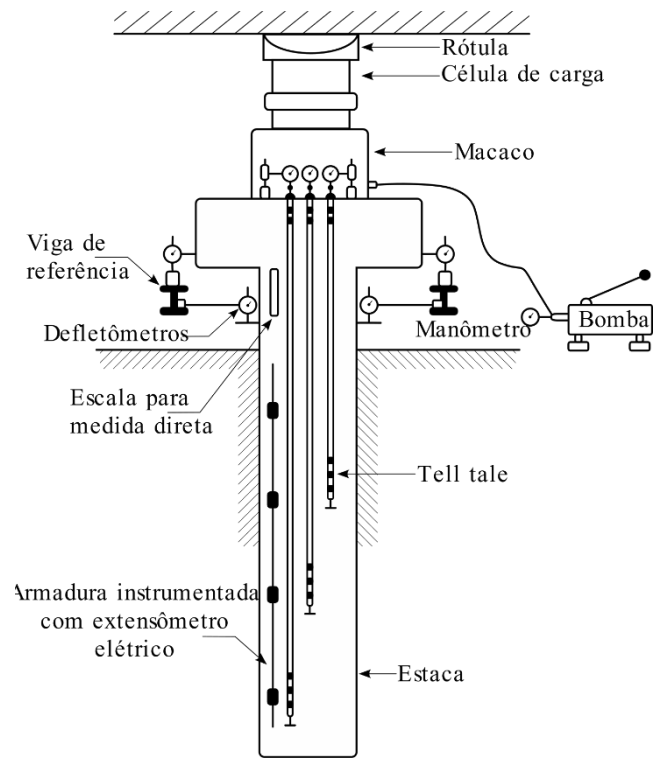
Cada um desses dispositivos aborda um princípio físico diferente, indicando os deslocamentos nas estacas em diferentes profundidades. A Tabela 2.1 apresenta um breve resumo de cada um desses instrumentos. Já a Figura 2.9 mostra um esquema típico de instrumentação de estacas.

Tabela 2.1 - Tipos de instrumentação e seus respectivos princípios de funcionamento

Tipo	Princípio físico	Definição/Aplicação
Extensômetros elétricos (Strain-gages)	Variação de resistência elétrica em função da deformação	São pequenos sensores metálicos instalados na armadura da estaca. Quando ocorre deformação, há variação na resistência elétrica do sensor, permitindo determinar a deformação local e, a partir disso, calcular as tensões e forças atuantes ao longo da estaca (Niyama; Aoki; Chamecki, 1998).
Tell-tale	Medição mecânica de deslocamento relativo entre pontos fixos	Consiste em hastes fixadas em diferentes profundidades dentro da estaca, ligados a um ponto de referência no topo. A variação de posição entre os pontos indica deslocamentos internos, permitindo identificar a mobilização de carga ao longo do fuste e na ponta (Niyama; Aoki; Chamecki, 1998).
Cordas vibrantes	Variação da frequência natural de vibração de um fio tensionado	Baseia-se na mudança da frequência de vibração de um fio de aço submetido a deformações. Essa variação é convertida em sinal elétrico, possibilitando medir tensões ou deformações com alta precisão ao serem aplicadas cargas na estaca (Silva <i>et al.</i> , 2001).
Fibra óptica	Variação das propriedades de reflexão ou refração da luz em função da deformação.	Utiliza cabos de fibra óptica instalados ao longo da estaca, nos quais a luz é refletida em pontos específicos. As alterações no comprimento de onda refletido permitem medir deformações contínuas ao longo do fuste, oferecendo alta precisão (Maciel; Veloso; Lopes, 2013).

Fonte: Autor (2025)

Figura 2.9 – Instrumentação típica utilizando *strain-gages* e *tell-tales* em estaca



Fonte: Modificado por Carvalho (2024) de Niyama; Aoki; Chamecki, (1998)

2.3 Métodos de previsão de capacidade de carga em estacas

2.3.1 Aoki e Velloso (1975)

O método de Aoki e Velloso (1995) é um dos métodos empíricos mais usados no Brasil para a previsão de capacidade de carga a partir de resultados do SPT. Ele foi proposto pelos brasileiros Nelson Aoki e Dirceu Velloso e é particularmente popular porque utiliza dados que normalmente já estão disponíveis nos projetos (perfil de sondagem).

O método parte da premissa de que a capacidade de carga de uma estaca é igual a soma da resistência de ponta (Q_p), associada ao solo na base da estaca, com a resistência lateral (Q_l), associada ao atrito do solo e o fuste da estaca.

A resistência de ponta é dada pela seguinte formulação:

$$Q_p = \frac{k N_p A_p}{F_1} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

Q_p = resistência de ponta da estaca (kN);

k = coeficiente de correção tabelado para cada tipo de solo;

N_p = número médio de golpes do ensaio SPT na camada de solo na base da estaca;

A_p = área da ponta da estaca;

F_1 = fator de correção para correção da resistência de ponta da estaca de acordo com o tipo.

Já a resistência lateral é dada da seguinte forma:

$$Q_l = \frac{U \sum_1^n (a \cdot k \cdot N_L \cdot \Delta_L)}{F_2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

Q_l = resistência lateral da estaca (kN);

U = perímetro da seção transversal da estaca;

n = número de camadas;

a = coeficiente tabelado de acordo com o tipo de solo;

N_L = número de golpes do ensaio SPT na camada n;

Δ_L = comprimento da camada n;

F_2 = fator de correção para resistência lateral de acordo com o tipo de estaca.

É importante ressaltar que esse método foi inicialmente desenvolvido a partir do ensaio CPT (*Cone Penetration Test*) e, posteriormente, adaptado para o SPT. Por esse motivo, foi necessário fazer correções no modelo. A Tabela 2.2 apresenta os coeficientes k e α , que variam conforme o tipo de solo, enquanto a Tabela 2.3 reúne os fatores de correção F_1 e F_2 , responsáveis por ajustar o comportamento do modelo na representação de estacas.

Tabela 2.2 - Coeficientes k e α para o método Aoki e Velloso (1975)

Tipo de solo	K (Kgf/cm²)	α (%)
Areia	10,0	1,4
Areia siltosa	8,0	2,0
Areia silto-argilosa	7,0	2,4
Areia argilo-siltosa	5,0	2,8
Areia argilosa	6,0	3,0
Silte arenoso	5,5	2,2
Silte areno-argiloso	4,5	2,8
Silte	4,0	3,0
Silte argilo-arenoso	2,5	3,0
Silte argiloso	2,3	3,4
Argila arenosa	3,5	2,4
Argila areno-siltosa	3,0	2,8
Argila silto-arenosa	3,3	3,0
Argila siltosa	2,2	4,0
Argila	2,2	6,0

Fonte: Aoki-Velloso (1975)

Tabela 2.3 - Valores de F_1 e F_2 do método Aoki-Velloso (1975)

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	2 F1
Metálica	1,75	2 F1
Pré-moldada	$1 + D/0,8$	2 F1
Escavada	3	2 F1
Raiz/Hélice	2	2 F1

Fonte: Aoki-Velloso (1975)

Onde,

D = diâmetro da estaca.

Portanto, a carga máxima que a estaca pode suportar seria dada pela seguinte equação:

$$P_{adm} = \frac{Q_p + Q_l}{FS} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

P_{adm} = Carga admissível da estaca;

FS = Fator de Segurança igual a 2.

2.3.2 Décourt e Quaresma (1978, 1996)

Outro método bastante utilizado pelos projetistas é o modelo de Décourt-Quaresma, desenvolvido em 1978. Trata-se, também, de um método semiempírico que se baseia em dados do relatório de sondagem SPT, tais como o tipo de solo e a resistência da camada. O método leva em consideração tanto a resistência de ponta quanto a resistência lateral na determinação da carga última. Inicialmente o método foi desenvolvido para estacas pré-moldadas de concreto. Posteriormente foi adaptado por Décourt *et al* (1996) para outros tipos de estacas adotando os coeficientes α e β apresentados na Tabela 2.4 e Tabela 2.5.

Tabela 2.4 - Valores de α do método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)

Tipo de solo	Escavadas em geral	Escavadas (Bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas sob alta pressões
Argila	0,85	0,85	0,30	0,85	1,00
Solos intermediários	0,60	0,60	0,30	0,60	1,00
Areias	0,50	0,50	0,30	0,50	1,00

Fonte: Décourt e Quaresma (1978, 1996)

Tabela 2.5 - Valores de β do método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)

Tipo de solo	Escavadas em geral	Escavadas (Bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas sob alta pressões
Argila	0,80	0,90	1,00	1,50	3,00
Solos intermediários	0,65	0,75	1,00	1,50	3,00
Areias	0,50	0,60	1,00	1,50	3,00

Fonte: Décourt e Quaresma (1978, 1996)

A resistência de ponta é dada pela seguinte formulação:

$$Q_p = k' \cdot N' \cdot A_p \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

Q_p = resistência de ponta da estaca;

k' = coeficiente em função do tipo de solo;

N' = valor médio do N_{SPT} , calculado a partir de três pontos: o da ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior;

A_p = área da ponta da estaca (m^2).

Tabela 2.6 - Valores do coeficiente de resistência de ponta em função do solo

Tipo de solo	k'(KPa)
Argilas	120
Siltos argilosos (alteração de rocha)	200
Siltos arenosos (alteração de rocha)	250
Areias	400

Fonte: Décourt e Quaresma (1978)

A resistência do atrito lateral é expressa por:

$$Q_l = 10\left(\frac{N}{3} + 1\right) \cdot U \cdot L \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

Q_l = resistência lateral da estaca (kN);

N = média do N_{SPT} ao longo do fuste da estaca, exceto a ponta e o primeiro metro da superfície do solo.

Portanto, a equação da carga última da estaca pode ser definida da seguinte forma:

$$Q_{adm} = \frac{\beta Q_l + \alpha Q_p}{2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Porém, em 1996, Décourt *et al.* sugeriu uma modificação da equação, alterando o coeficiente de segurança de 2 para 1,3, para a parcela de atrito lateral, e 4 para a resistência de ponta. O critério definido estabelece que entre os valores obtidos pelas duas equações, deve-se adotar o menor valor, conforme demonstrado em:

$$Q_{adm} \leq \begin{cases} \frac{\beta Q_l + \alpha Q_p}{2} \\ \frac{\beta Q_l}{1,3} + \frac{\alpha Q_p}{4} \end{cases} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde,

Q_{adm} = carga admissível da estaca.

3 METODOLOGIA

3.1 Banco de dados

O banco de dados utilizado neste trabalho foi disponibilizado pela empresa Arcos Engenharia de Solos e reúne informações detalhadas sobre estacas escavadas executadas com o uso de fluidos estabilizante dos tipos lama bentonítica e polímero. Ao todo, o banco conta com 47 estacas, sendo a maioria localizada na Região Sudeste do Brasil e uma na Região Sul, no período de 2013 à 2019.

Após uma avaliação criteriosa do banco de dados, foram aplicados critérios de exclusão às estacas que apresentavam inconsistências ou limitações que inviabilizavam o cálculo da resistência pelos métodos empíricos. Assim, foram excluídos os seguintes casos:

- estacas em que foram identificados erros de leitura ou inconsistências nos dados;
- situações em que o furo de sondagem apresentava profundidade inferior ao comprimento da estaca;
- casos com presença de rocha no subsolo, condição não contemplada pelos métodos utilizados;
- estacas em que apenas uma das parcelas resistentes (fuste ou ponta) atingiu ou se aproximou da ruptura, enquanto a outra permaneceu sem mobilização significativa desse estado.

Após a aplicação desses critérios, permaneceram 29 estacas para a análise.

Os relatórios disponibilizados pela empresa incluem informações fundamentais, como comprimentos escavados e concretados, diâmetros, a localização das células no fuste da estaca, cargas aplicadas durante os ensaios e os resultados de sondagens do tipo SPT próximo à estaca. Esses registros são de grande importância, pois fornecem a base necessária para a comparação entre diferentes métodos de previsão da capacidade de carga.

3.2 Tratamento das provas de carga

Devido ao fato do carregamento da PCEB acontecer no fuste da estaca, é necessário fazer correções das cargas aplicadas no fuste e na ponta devido ao peso próprio da estaca. O resultado final das cargas considera o peso flutuante do fuste, com a densidade do concreto armado de 25 kN/m³. Acima da célula expansiva hidrodinâmica, foi descontado das cargas mobilizadas para o fuste devido ao carregamento ascendente. À carga da ponta foi acrescido o

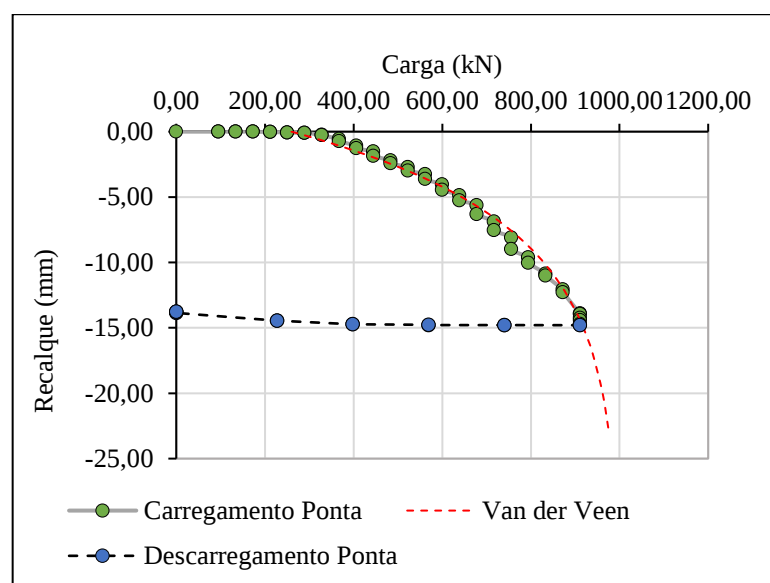
preso próprio do concreto abaixo da célula expansiva.

Como a maioria das provas de carga das estacas não atingiu a ruptura completa durante os ensaios, tornou-se necessária a utilização de um procedimento que permitisse estimar a carga última a partir do comportamento observado. Para isso, foi aplicado o método de extrapolação proposto por Van Der Veen (1953), baseado na análise da curva carga $\times$ recalque, tanto para a parcela de ponta quanto para a parcela de fuste.

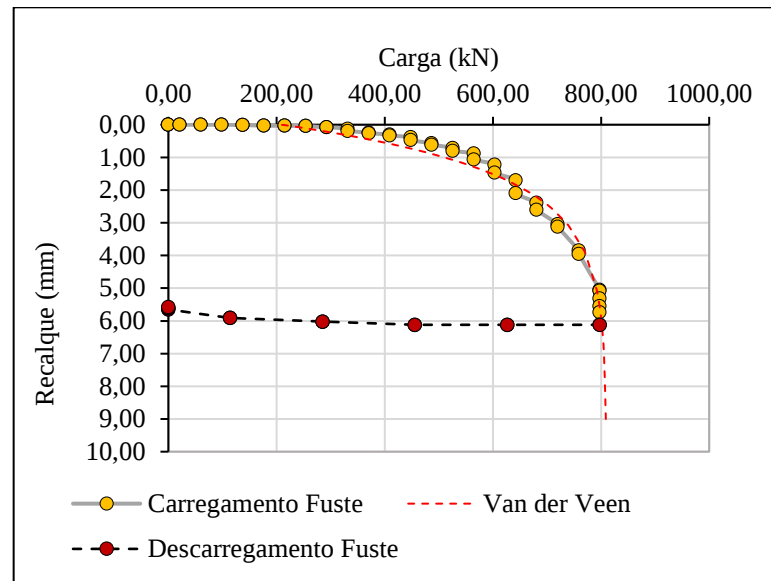
Esse método consiste no ajuste matemático da porção experimental da curva obtida no ensaio, permitindo projetar seu comportamento além dos valores medidos em campo. A partir dessa extrapolação, é possível estimar a carga correspondente à ruptura da estaca, mesmo quando o ensaio foi interrompido antes da ocorrência da ruptura física. Nessa condição, a estimativa das resistências últimas de atrito lateral e de ponta pode tornar-se limitada, pois as curvas de transferência de carga permanecem restritas ao intervalo da carga máxima aplicada no ensaio, não alcançando o nível de deformação plástica necessário para caracterizar a ruptura.

As Figura 3.1 e Figura 3.2 apresentam, respectivamente, exemplos de curvas carga $\times$ recalque referentes à ponta e fuste de uma estaca analisada. Observa-se que os deslocamentos das porções superior e inferior à célula apresentam, respectivamente, valores negativos e positivos. Esse comportamento está relacionado à posição de instalação da célula ao longo do fuste da estaca, que provoca movimentos em sentidos opostos durante o carregamento.

Figura 3.1 - Exemplo de curva carga $\times$ recalque da parcela de ponta



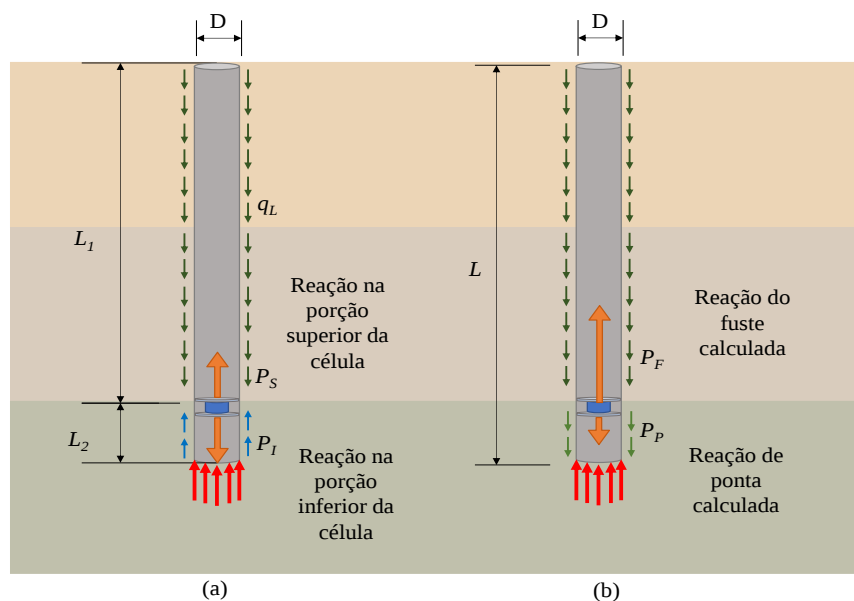
Fonte: Autor (2026)

Figura 3.2 - Exemplo de curva carga $\times$ recalque da parcela de fuste

Fonte: Autor (2026)

Após a realização desse procedimento, tornou-se necessária a correção das cargas de ponta e de atrito lateral. Isso porque, no ensaio de prova de carga com célula bidirecional, a parcela inferior da estaca, associada à resistência de ponta, também mobiliza parte do atrito lateral ao longo do trecho situado abaixo da célula. Dessa forma, parte da carga inicialmente atribuída à ponta inclui, na realidade, contribuição de atrito lateral. A Figura 3.3 apresenta a configuração das cargas fornecidas e corrigidas.

Figura 3.3 - Esquema de carga na PCEB: a) com carga fornecida pelo ensaio; b) com carga de fuste e ponta recalculadas



Fonte: Carvalho (2024)

Assim, para que a interpretação dos resultados represente adequadamente o mecanismo da reação de resistência da estaca, o atrito lateral mobilizado nesse trecho deve ser desconsiderado da parcela de ponta e incorporado à parcela de fuste. Para isso, sabendo que a parcela acima da célula é composta inteiramente por atrito lateral, foi calculado o atrito médio (q_L) a partir da seguinte equação:

$$q_L = \frac{Q_L}{L_1} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

q_L = atrito médio aplicado à porção acima da célula bidirecional, em kN/m;

Q_L = resistência lateral da estaca, em kN;

L_1 = comprimento da estaca acima da célula bidirecional, em m.

Desse modo, a partir da carga total aplicada à estaca, recalculou-se as cargas de fuste e de ponta. A nova carga de fuste é expressa por:

$$Q_L' = Q_L + (q_L \cdot L_2) \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

Q_L' = resistência lateral corrigida da estaca, em kN;

Q_L = resistência lateral da estaca, em kN;

q_L = atrito médio aplicado à porção acima da célula bidirecional, em kN/m;

L_2 = comprimento da estaca abaixo da célula bidirecional, em m.

Portanto, a nova carga de ponta é dada por:

$$Q_P' = Q_{adm} - Q_L' \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

Q_P' = resistência de ponta corrigida, em kN;

Q_{adm} = resistência total admissível da estaca, em kN;

Q_L' = resistência lateral corrigida, em kN.

3.3 Comparação entre valores previstos e medidos

Para a obtenção dos valores previstos, foram aplicados os métodos de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978,1996), por meio de planilhas elaboradas no Excel e previamente calibradas com base em cálculos desenvolvidos manualmente.

Os resultados estimados de resistência lateral, de ponta e total foram, então, comparados aos valores medidos nas provas de carga, permitindo uma análise mais criteriosa do desempenho de cada método, tanto em termos de carga total quanto para cada parcela resistente isoladamente.

Para essa análise, foi utilizada a razão entre o valor medido e o valor previsto, conforme apresentado na (Eq. 11). Dessa forma, quando a razão é inferior a 1, entende-se que o método está contra a segurança, pois o valor previsto supera o valor efetivamente medido em campo.

$$r = \frac{R_M}{R_P} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

R_M = resistência medida na prova de carga, em kN;

R_P = resistência prevista pelo método semiempírico, em kN.

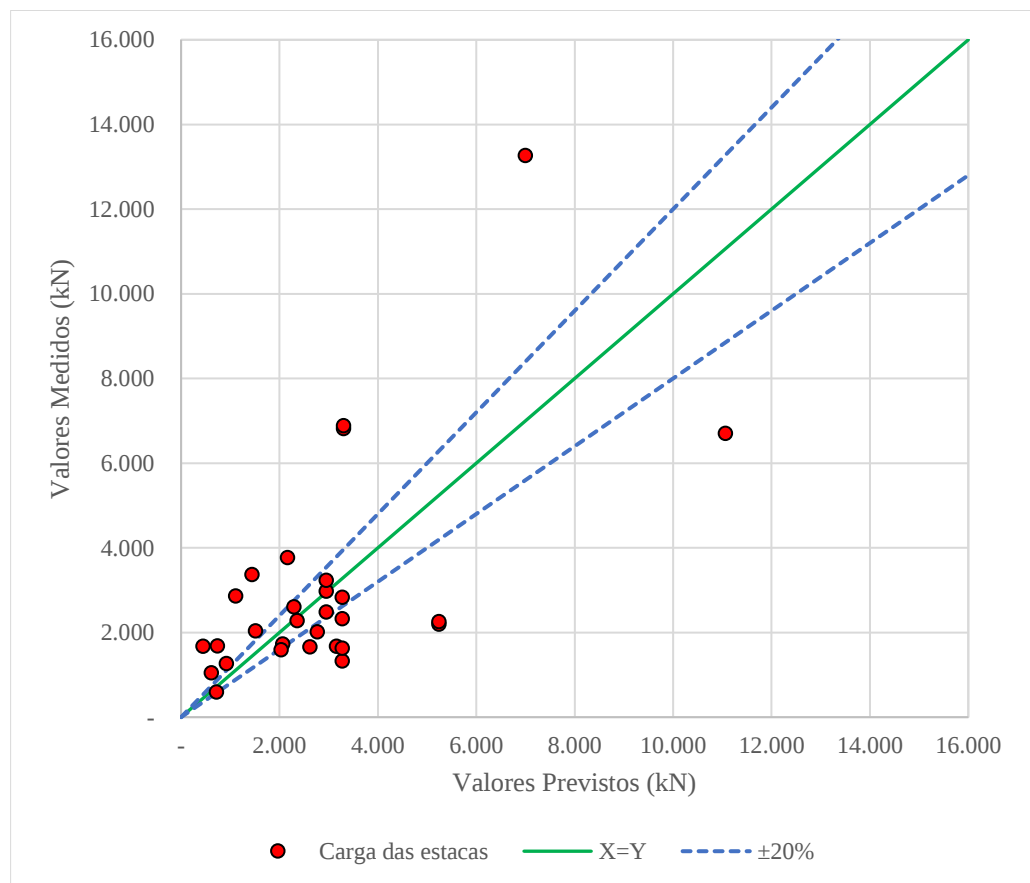
Para a avaliação do desempenho dos métodos semiempíricos brasileiros em relação aos resultados das provas de carga bidirecionais, adotou-se o critério de classificação apresentado no trabalho de Oliveira e Limiro (2019). A análise baseia-se na razão entre a carga medida na prova de carga e a carga prevista pelo método de cálculo, parâmetro que permite quantificar o grau de aproximação entre valores experimentais e estimados.

De acordo com o critério feito pelos autores, consideram-se aceitáveis os resultados cuja razão esteja compreendida entre 0,8 e 1,2, intervalo que corresponde a uma margem de erro de $\pm 20\%$ em relação ao valor medido. Quando a razão apresentada é inferior a 0,8, a estimativa é classificada como contra a segurança, indicando que o método subestimou a capacidade resistente em comparação ao valor medido. Para razões entre 1,2 e 2,0, os resultados são considerados a favor da segurança. Já valores superiores a 2,0 indicam subestimação da capacidade de carga, refletindo comportamento conservador nas previsões.

Para melhor compreensão, a Figura 3.4 apresenta a dispersão dos resultados da razão entre os valores previstos e medidos para a carga de ponta obtida pelo método de Aoki e Velloso

(1975). No gráfico, esses valores são comparados em relação à reta de inclinação $y = x$ (linha verde), que representa a condição de concordância perfeita entre as cargas previstas e aquelas obtidas experimentalmente. Assim, quanto mais próximos os pontos estiverem dessa reta, maior é a precisão das estimativas realizadas pelo método, enquanto afastamentos mais significativos indicam discrepâncias entre os resultados teóricos e os valores medidos nas provas de carga. As retas posicionadas acima e abaixo da reta central delimitam a faixa correspondente a uma margem de erro de $\pm 20\%$, utilizada como critério para avaliar a aceitabilidade das previsões.

Figura 3.4 - Gráfico de dispersão dos fatores de segurança para carga de ponta do método de Aoki-Velloso (1975)



Fonte: Autor (2026)

3.4 Cálculo alternativo para carga última da estaca

De acordo com a ABNT NBR 6122 (2022), que estabelece os requisitos para projeto e execução de fundações, nos casos de estacas escavadas com estabilização por fluido e estacas hélice contínua em que não seja possível assegurar o contato efetivo entre a ponta da estaca e o solo competente ou rocha, a contribuição da resistência de ponta deve ser desconsiderada na verificação do Estado Limite Último (ELU). A norma estabelece que na ausência dessa

comprovação, a resistência mobilizada na ponta não pode ser considerada no dimensionamento, devendo-se adotar condição de resistência nula nessa parcela, o que implica ajuste tanto da carga resistente quanto do fator de segurança.

Com base nessa diretriz normativa, e considerando que os relatórios fornecidos pela ARCOS não apresentavam informações que assegurassem explicitamente o contato efetivo entre a ponta da estaca e o solo competente, optou-se por realizar uma reavaliação dos resultados das provas de carga para fins apenas de verificação dessa exigência. Para tanto, foi recalculada a carga total resistente, desconsiderando-se a contribuição da ponta, bem como determinado um novo fator de segurança associado a essa condição, usando a carga total prevista pelos métodos.

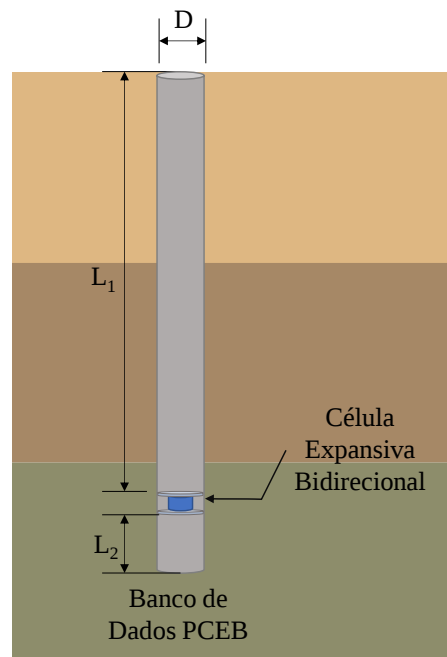
4 RESULTADOS

4.1 Análise estatística do banco de dados

Foi realizada uma análise estatística das informações contidas no banco de dados, com foco nos principais parâmetros geométricos e de carregamento das estacas, tais como o comprimento total, os comprimentos dos trechos acima e abaixo da célula, o diâmetro e as cargas aplicadas. O objetivo foi avaliar a variabilidade e a dispersão desses dados, identificando possíveis concentrações e valores discrepantes.

Para essa finalidade, utilizou-se a representação gráfica por meio de *boxplots*, ferramenta que permite visualizar de forma clara a curva de distribuição dos dados, seus quartis, a mediana e eventuais *outliers*. Essa abordagem possibilitou uma maior compreensão da distribuição estatística da amostra, contribuindo para a interpretação dos resultados. A Figura 4.1 mostra um esquema típico da montagem da PCEB com alguns parâmetros analisados.

Figura 4.1 – Parâmetros geométricos da análise do banco de dados



Fonte: Adaptado de Carvalho (2024)

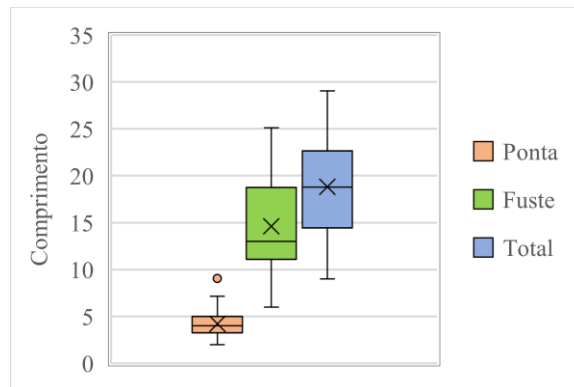
4.1.1 Comprimento

Os comprimentos totais das estacas apresentaram uma variação significativa entre 9 e 29,09 m. Tais comprimentos se dividem entre a porção de fuste (L_1) e de ponta (L_2), que são os comprimentos acima e abaixo da célula de carga respectivamente. Em relação a porcentagem

do comprimento da ponta, os dados apresentam de 8,70 à 33,33% do comprimento total da estaca, havendo um *outlier* igual a 39,01%.

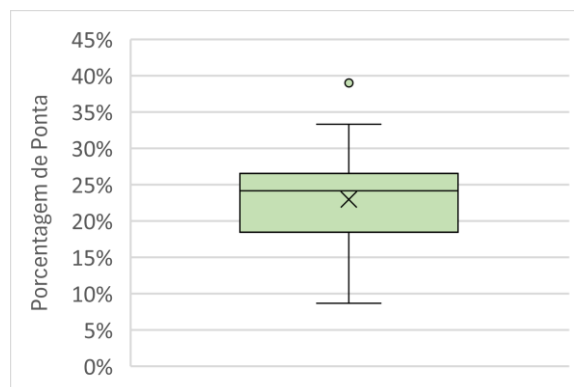
Esses dados estão apresentados nos *boxplots* das Figura 4.2 e Figura 4.3, respectivamente. Nesse tipo de gráfico, as extremidades inferior e superior da caixa correspondem, respectivamente, ao primeiro e ao terceiro quartil, delimitando o intervalo interquartil dos dados. A linha traçada no interior da caixa representa a mediana da amostra, indicando a posição central dos valores analisados. As linhas que se prolongam a partir da caixa indicam os limites inferior e superior do conjunto de dados. Dessa forma, quanto maior a extensão total do gráfico, maior é a variabilidade e, conseqüentemente, o grau de dispersão dos resultados.

Figura 4.2 - Boxplot dos dados de comprimento de ponta, fuste e total



Fonte: Autor (2026)

Figura 4.3 – Boxplot dos dados da relação percentual entre comprimento total e comprimento de ponta



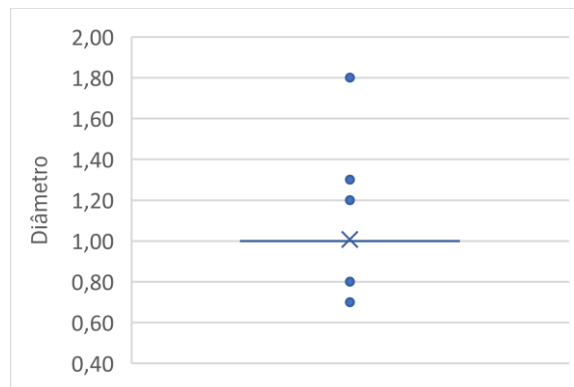
Fonte: Autor (2026)

4.1.2 Diâmetro

No que se refere ao diâmetro das estacas, observa-se uma variação entre 0,70 m e 1,80 m, sendo que a maior parte delas apresenta diâmetro de 1,00 m. Essa maior ocorrência indica

uma padronização na execução, possivelmente relacionada ao desempenho estrutural, a disponibilidade de equipamentos e a viabilidade econômica. A Figura 4.4 mostra o *boxplot* dos dados de diâmetros das estacas. Observa-se que, devido à predominância de estacas com diâmetro de 1,0 m, não foi possível obter uma separação representativa em quartis, uma vez que os dados se concentram majoritariamente em um único valor, característica de uma curva de distribuição estreita de pequeno desvio padrão.

Figura 4.4 – *Boxplot* dos diâmetros das estacas

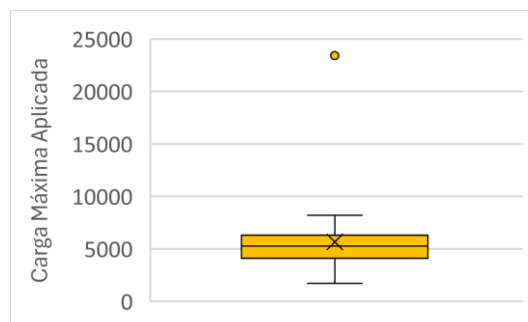


Fonte: Autor (2026)

4.1.3 Carregamento

A intensidade dos carregamentos apresentou uma variação ampla ao longo da amostra analisada. Os valores observados situaram-se, em sua maioria, no intervalo entre 1.708,7 kN e 8.818,15 kN, evidenciando uma dispersão significativa dos dados. Destaca-se, ainda, a ocorrência de um *outlier* correspondente a 23.418,49 kN, valor consideravelmente superior aos demais, o que indica um carregamento atípico entre os outros dados da amostra e potencialmente influente na análise estatística dos resultados. A Figura 4.5 mostra o *boxplot* com os dados de carregamento das estacas.

Figura 4.5 - *Boxplot* do carregamento máximo aplicado na estaca

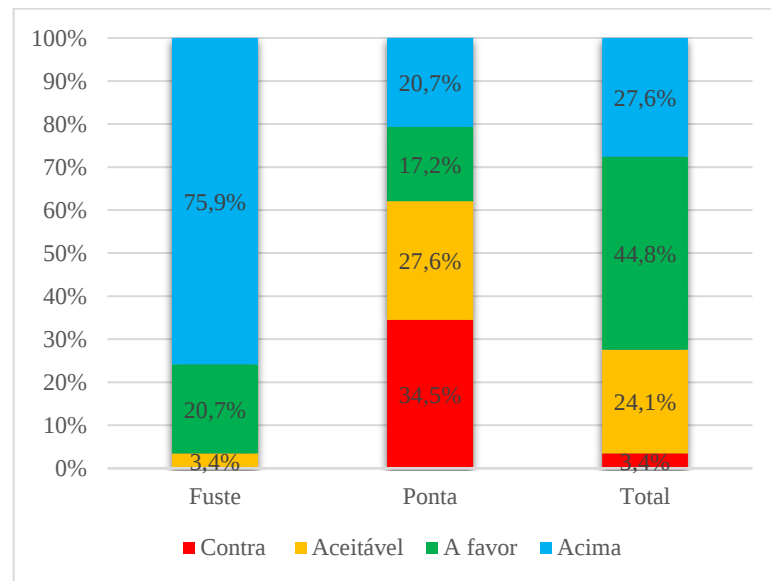


Fonte: Autor (2026)

4.2 Avaliação dos métodos Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978)

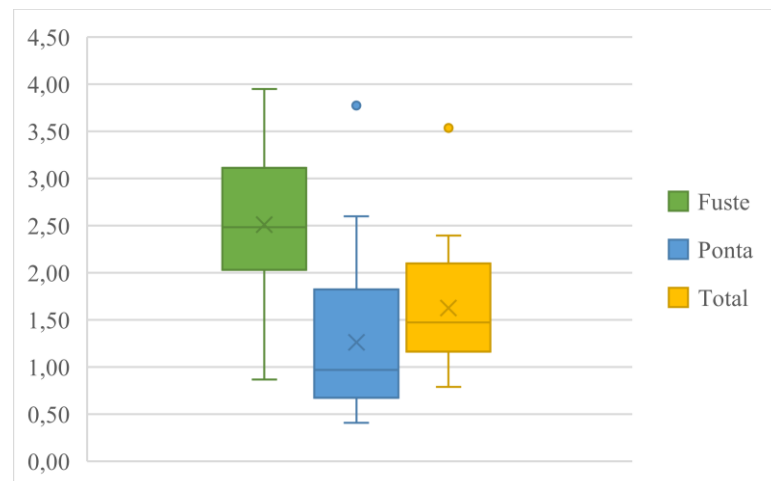
As Figura 4.6 e Figura 4.7 apresentam o percentual dos fatores de segurança e a distribuição dos resultados para o método de Aoki-Velloso (1975), respectivamente.

Figura 4.6- Percentual de valores aceitáveis, contra e a favor da segurança do método de Aoki-Velloso (1975)



Fonte: Autor (2026)

Figura 4.7 - Distribuição dos resultados do método de Aoki-Velloso (1975) em relação à razão de segurança de carga aplicada no método e do medido na prova de carga



Fonte: Autor (2026)

Ao analisar os resultados, na Figura 4.6, verifica-se que o método de Aoki e Velloso (1975) apresentou subdimensionamento significativo da carga de fuste, observado em 75,9% dos casos analisados. Esse resultado indica tendência do método em estimar cargas menores

para a contribuição do atrito lateral em relação aos valores obtidos nas provas de carga, evidenciando afastamento considerável entre as estimativas teóricas e os resultados experimentais para essa parcela de resistência.

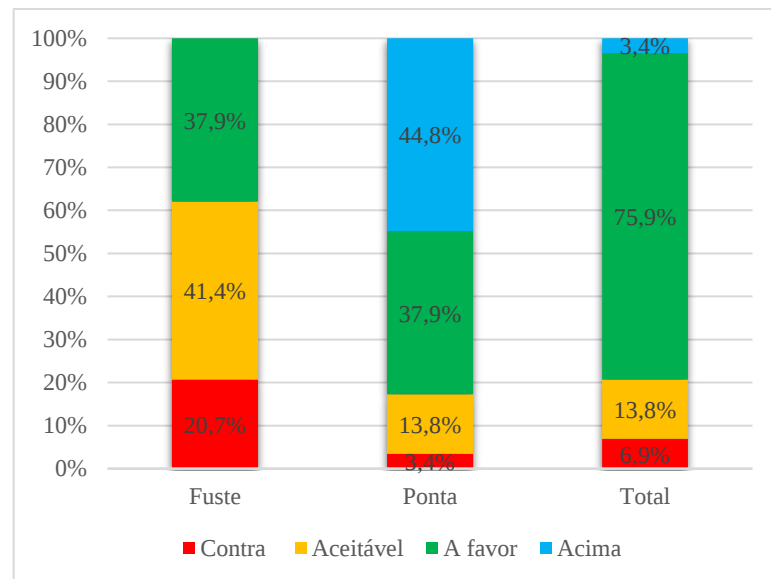
No que se refere à resistência de ponta, o método apresentou comportamento bastante disperso, com resultados distribuídos entre diferentes faixas de classificação. Além disso, observou-se também a maior incidência de valores superestimados, correspondendo a 34,5% de valores contra a segurança. Esse cenário evidencia inconsistência no desempenho do método para a estimativa da resistência de ponta, gerando incertezas quanto à sua confiabilidade e precisão na determinação das cargas resistentes de ponta nas condições avaliadas.

De modo geral, ao analisar a dispersão dos resultados referentes à carga total, verifica-se que o método apresenta desempenho satisfatório do ponto de vista da segurança do projeto. Observa-se que o superdimensionamento da resistência mobilizada pelo atrito lateral tende a compensar o subdimensionamento verificado na parcela de ponta, resultando em estimativas globais mais próximas dos valores obtidos experimentalmente.

Além disso, na Figura 4.7, observa-se predominância de valores da razão Medido/Previsto superiores a 1, indicando que, na maior parte dos casos, as cargas previstas superam as cargas medidas. Esse comportamento evidencia uma tendência conservadora nas estimativas, o que contribui para reduzir a probabilidade de subestimação da capacidade resistente. Entretanto, essa postura mais conservadora pode implicar dimensionamentos menos econômicos, uma vez que conduz à adoção de capacidades resistentes superiores às efetivamente mobilizadas em campo.

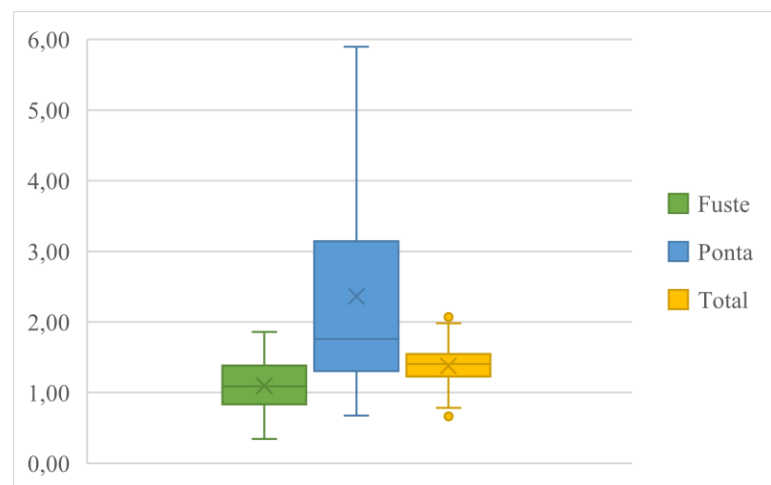
As Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam o percentual dos fatores de segurança e a distribuição dos resultados para o método de Décourt-Quaresma (1978, 1996), respectivamente.

Figura 4.8- Percentual de valores aceitáveis, contra e a favor da segurança pelo método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)



Fonte: Autor (2026)

Figura 4.9 - Distribuição dos resultados do método de Décourt-Quaresma (1978, 1996)



Fonte: Autor (2026)

O método de Décourt e Quaresma (1978, 1996) apresentou desempenho superior ao método de Aoki e Velloso (1975) na estimativa da resistência de fuste, demonstrando maior proximidade entre os valores previstos e aqueles obtidos nas PCEB's. Observa-se que 37,9% dos resultados foram classificados como a favor da segurança e 41,4% situaram-se dentro da faixa considerada aceitável, o que representa parcela significativa das previsões dentro da margem de erro de $\pm 20\%$. Esses resultados indicam que, para a maioria dos casos analisados, o método apresentou boa capacidade de estimar a contribuição do atrito lateral.

Ainda assim, 20,7% das previsões ficaram abaixo dos valores medidos

experimentalmente, evidenciando ocorrências de subestimação da capacidade resistente. Embora não seja a tendência predominante, esses casos indicam que o método pode apresentar variações pontuais na estimativa da resistência de fuste, dependendo das condições específicas do solo e das características das estacas analisadas.

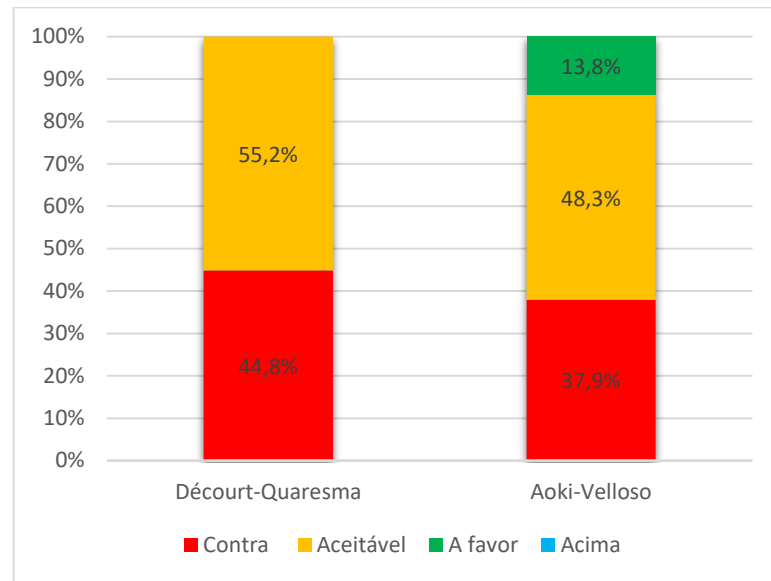
No que se refere à resistência de ponta, o método apresentou comportamento mais conservador, com 44,5% dos valores classificados como superestimados. A análise da distribuição apresentada na Figura 4.9 evidencia que grande parte das razões Medido/Previsto concentra-se no intervalo entre 3,00 e 6,00, indicando que, para essa parcela, as previsões tendem a ser significativamente superiores aos valores obtidos experimentalmente. Esse padrão reforça a tendência do método em adotar estimativas bastante conservadoras para a contribuição da ponta.

Apesar das limitações observadas na análise isolada das parcelas de fuste e ponta, o método apresentou desempenho consistente na previsão da resistência total da estaca. Apenas 6,9% dos resultados foram classificados como contra a segurança e 3,4% como excessivamente superestimados, demonstrando que na avaliação global, as discrepâncias tendem a se compensar. Dessa forma, o método não se afasta de maneira significativa dos valores medidos, revelando-se adequado para a estimativa da capacidade total, com potencial para conduzir a projetos seguros e economicamente viáveis nas condições analisadas.

4.3 Cálculo alternativo para a carga última da estaca

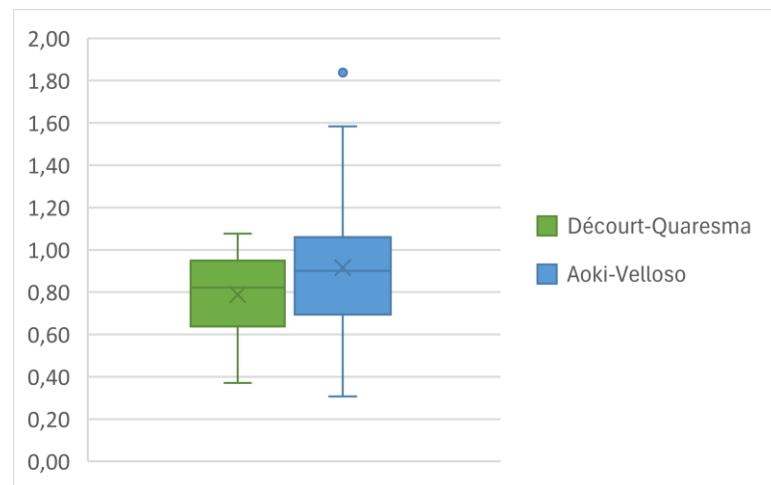
As Figura 4.10 e Figura 4.11 apresentam os resultados do cálculo de segurança para cada estaca para ambos os métodos avaliados.

Figura 4.10 – Percentual dos fatores de segurança recalculados para resistência total



Fonte: Autor (2026)

Figura 4.11 – *Boxplot* dos fatores de segurança recalculados



Fonte: Autor (2026)

Conforme já era esperado, a desconsideração da resistência de ponta implicou redução significativa dos fatores de segurança para ambos os métodos analisados. Esse comportamento é coerente com o fato de que a exclusão de uma parcela resistente impacta diretamente a capacidade total da estaca, tornando o dimensionamento mais crítico sob o ponto de vista da verificação no ELU.

O método de Aoki e Velloso (1975) apresentou o cenário mais desfavorável entre os analisados, com 44,8% dos casos classificados como contra a segurança e 55,2% situados na faixa considerada aceitável, não havendo resultados enquadrados como a favor da segurança. Esse comportamento indica que as estimativas do método, nas condições avaliadas, tendem a

se aproximar do limite inferior de segurança quando a resistência de ponta é desconsiderada.

Dessa forma, evidencia-se uma forte dependência da contribuição da ponta para a obtenção de fatores de segurança mais elevados, sugerindo que a exclusão dessa parcela impacta de maneira significativa o desempenho do método na avaliação da capacidade resistente das estacas.

Já o método de Décourt e Quaresma (1978, 1996) também apresentou redução expressiva no desempenho, registrando 37,9% dos resultados classificados como contra a segurança. Contudo, ainda apresentou 13,8% dos casos enquadrados como a favor da segurança, o que demonstra certa capacidade do método em fornecer estimativas conservadoras mesmo após a desconsideração da resistência de ponta.

Apesar disso, esse percentual ainda pode ser considerado relativamente baixo, indicando que a maioria das previsões permaneceu concentrada entre valores aceitáveis ou contra a segurança, evidenciando que a exclusão da parcela de ponta também impacta de forma significativa o desempenho do método.

5 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, verificou-se que o método de Décourt-Quaresma (1978, 1996) apresentou desempenho superior ao método de Aoki e Velloso (1975), ao atingir uma maior taxa de acerto na estimativa da carga total das estacas. Esse resultado indica uma melhor estimativa global do método aos valores medidos nas provas de carga.

Entretanto, quando analisadas separadamente as parcelas de resistência de fuste e de ponta, ambos os métodos apresentaram discrepâncias em relação aos valores experimentais. Observou-se que tais diferenças ocorrem de forma compensatória, ou seja, valores superestimados em uma parcela são equilibrados por valores subestimados na outra. Como consequência, embora existam limitações na estimativa individual das parcelas resistentes, os métodos tendem a fornecer resultados satisfatórios para a capacidade de carga total.

Com relação à desconsideração da parcela de ponta no cálculo da resistência total da estaca, conforme a ABNT NBR 6122 (2022), é importante destacar a relevância dessa contribuição para a capacidade resistente. Nesse sentido, torna-se fundamental verificar o contato efetivo da ponta da estaca com o solo competente, a fim de justificar adequadamente sua inclusão ou exclusão no dimensionamento.

A desconsideração indevida dessa parcela pode levar à subestimação da capacidade de carga e, conseqüentemente, ao superdimensionamento das estacas, resultando em soluções menos econômicas. Portanto, a avaliação criteriosa das condições de apoio da ponta é essencial para garantir um dimensionamento mais realista e eficiente.

REFERÊNCIAS

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Previsão e controle das fundações**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

AOKI, Nelson; VELLOSO, Dirceu de Alencar. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. *In: Vº CONGRESO PANAMERICANO DE MECANICA DE SUELOS E INGENIERIA DE FUNDACIONES. International society for soil mechanics and foundation engineering*. Buenos Aires, Argentina: 1975.

CARVALHO, Sofia Leão. **Previsão da capacidade de carga de estacas hélice contínuas por meio de Redes Neurais Artificiais**. Doutorado—Goiânia: UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2024.

CINTRA, José Carlos A. *et al.* **Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

DADA, Thais Lucouvicz. **Ensaio bidirecional em estacas moldadas in loco: técnicas de execução e métodos de interpretação, com aplicação a casos de obras**. Mestrado em Engenharia Geotécnica—São Paulo: Universidade de São Paulo, 22 out. 2019.

DANZIGER, Bernadete Ragoni; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações em estacas**. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2022.

DÉCOURT, L.; ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. A. **Análise e projeto de fundações profundas**. São Paulo: PINA, 1996.

DÉCOURT, Luciano; QUARESMA, Arhur R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. 1978.

FELLENIUS, Bengt H. Basics of Foundation Design. 2019.

MACIEL, Renato da Silva; VELOSO, Luis Augusto Conte Mendes; LOPES, Romulo. Utilização de sensores à base de fibra óptica visando o monitoramento de grandes estruturas na engenharia civil. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], v. 5, p. 105–114, 2013.

NIENOV, Fabiano Alexandre. **Desempenho de estacas escavadas de grande diâmetro em solo arenoso sob carregamento vertical**. Doutorado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mar. 2016.

NIYAMA, Sussumu; AOKI, Nelson; CHAMECKI, Paulo Roberto. **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

OLIVEIRA, Bismarck Chaussê; LIMIRO, Gabriella Cândida De Paula. Avaliação Da Previsão Semi-Empírica Da Capacidade De Carga De Estacas Escavadas E Hélice-Contínua a Partir De Resultados De Provas De Carga Estática Instrumentadas. 2019.

Projeto e execução de fundações. ABNT NBR 6122. . 25 mar. 2022.

SILVA, Tony I. *et al.* DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR A CORDA VIBRANTE PARA APLICAÇÃO EM ENGENHARIA DE REABILITAÇÃO. *In:* , 2001, Habana. **II Congresso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica**. Habana: [s. n.], 2001.

Solo - Prova de carga em fundação direta. ABNT NBR 6489. . 30 set. 2019.

Solo - Prova de carga estática em fundação profunda. ABNT NBR 16903. . 29 set. 2020.

VANN DER VEEN C. The bearing capacity of a pile. *In:* 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Anais...** Zurich: 1953.

VELLOZO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais e fundações profundas**. [S.l.]: Oficina de textos, 2011.

ANEXO
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia/Tese/Dissertação), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora.

Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.

 Documento assinado digitalmente
JOAO BARBOSA DE SOUZA NETO
Data: 13/05/2026 10:33:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Data e local da assinatura eletrônica