

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS TEÓRICOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES DO TIPO HÉLICE CONTÍNUA

COMPARATIVE ANALYSIS OF THEORETICAL METHODS FOR PREDICTING
THE LOAD-BEARING CAPACITY OF CONTINUOUS FLIGHT AUGER
FOUNDATIONS

Engenharias • 25/03/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/774414783](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/774414783)

Fábio Masato Yamanaka¹
Aderian dos Santos Rodrigues²
Ariadenes Rodrigues dos Santos³
Darlem Araújo do Amaral⁴
Anderson Luis Matos Moreira⁵
Marcelo Rassy Teixeira⁶
Rodrigo da Cruz de Araújo⁷

RESUMO

Apesar da notável evolução na esfera técnica no cenário da construção civil, a estimativa da capacidade de carga de fundações ainda é um desafio para a engenharia, porque requer conhecimentos da interação solo-fundação, parâmetros do solo e as mudanças do mesmo pela execução da fundação, e o grau de incertezas existente na investigação geotécnica que vai desde o projeto à execução é significativo. Diversas pesquisas nos últimos anos têm se proposto a avaliar métodos alternativos para o cálculo da capacidade de carga e/ou ajuste nos métodos tradicionalmente usados. Visto isso, o presente trabalho apresenta uma avaliação da acurácia de três métodos teóricos utilizados para determinação da capacidade de carga aplicada a estacas do tipo hélice contínua. Os métodos estudados são o das Tensões efetivas, Tomlinson e NAVFAC. A amostra de 64 estacas foi retirada de um banco de dados resultante de provas de cargas para diversos tipos de estacas, tendo como valores de referência para as devidas comparações os resultados de provas de carga de cada estaca. Concluiu-se a partir da análise que, se ajustado, o método de NAVFAC pode estimar satisfatoriamente a capacidade de carga, tendo apresentado melhora significativa a partir da primeira análise e se destacando em relação aos outros métodos.

Palavras-chave: Comportamento de Estacas. Investigação Geotécnica. Desempenho de Fundações Profundas.

ABSTRACT

Despite the remarkable evolution in the technical sphere in the civil construction scenario, the estimation of the load capacity of foundations is still a challenge for engineering, because it requires knowledge of the soil-foundation interaction, soil parameters and changes of the same by the execution of the foundation, and the

degree of uncertainty existing in the geotechnical investigation that goes from design to execution is still significant. Several researches in recent years have proposed to evaluate alternative methods for calculating the load capacity and / or adjustment in the traditionally used methods, this is because the validity of these methods is restricted to specific practices and conditions of the cases in which they were developed. Given this, the present work presents an evaluation of the accuracy of three theoretical methods used to determine the load capacity applied to piles of the continuous Helix type. The methods studied are the effective tensions, Tomlinson and NAVFAC. The sample of 64 piles was taken from a database resulting from Load Tests for various types of piles, having as reference values for the due comparisons, the results of the loads of the tests of each pile. It was concluded after analysis that if adjusted, the NAVFAC method can satisfactorily predict an estimate for load capacity, having presented significant improvement from the first analysis and standing out in relation to other methods.

Keywords: Pile Behavior. Geotechnical Investigation. Deep Foundation Performance.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Pinto (1988) “todo projeto de fundações contempla as cargas aplicadas pela obra e a resposta do solo a estas solicitações”. Sendo assim as fundações são as partes de uma estrutura que transmitem ao terreno subjacente seu peso, o peso da superestrutura e qualquer outra força que atue sobre ela, sendo então as fundações a base de cada obra, isto é, o elemento de ligação entre a superestrutura e o solo (ANDRADE, 2003). As fundações são divididas em dois tipos, as superficiais (ou rasas ou diretas) e as profundas.

Uma das mais antigas escolhas de base de estruturas são as fundações em estacas, que consistem em elementos esbeltos de grande comprimento relativo, porém projetá-las ainda é um desafio para a engenharia visto que seu projeto é muito baseado em princípios empíricos (AVIZ, 2006).

Nesse contexto, a investigação geotécnica assume papel fundamental na redução das incertezas associadas ao comportamento do solo e ao desempenho das fundações. A caracterização do subsolo é frequentemente limitada pela variabilidade natural dos materiais geotécnicos e pelas restrições inerentes aos métodos de investigação, o que pode resultar em lacunas na definição dos parâmetros de projeto. Dessa forma, diferentes estudos na área da engenharia geotécnica têm ressaltado a necessidade de aprimorar os procedimentos de investigação e interpretação dos dados obtidos em campo e em laboratório. A adoção de abordagens analíticas e estatísticas, associadas à análise criteriosa dos resultados de ensaios geotécnicos, contribui para uma avaliação mais consistente das propriedades do solo, permitindo reduzir as incertezas presentes na etapa de caracterização geotécnica e fornecer maior confiabilidade às soluções de fundação adotadas (OLIVEIRA et al., 2025; RODRIGUES et al., 2025; SILVA et al., 2025; YAMANAKA et al., 2025).

Para Neto (2002) o considerável grau de incerteza ainda existente na investigação geotécnica, no projeto e execução de fundações profundas eleva a importância de adotar medidas que venham a verificar e/ou direcionar os estudos geotécnicos de fundação.

Morgenstern (1995) é mais minucioso ao considerar e dividir as incertezas existentes na investigação geotécnica em três categorias:

incerteza dos parâmetros, incerteza do modelo e incerteza humana. A primeira representa a incerteza dos parâmetros geotécnicos de análise, a segunda é devida às limitações das teorias e modelos usados na previsão do desempenho e a incerteza humana está relacionada com os erros e enganos humanos.

Diante de tais incertezas, diversos estudos têm sido desenvolvidos buscando avaliar qualitativamente diferentes métodos de previsão de capacidade de carga para estacas (e.g. SHOOSH PASHA et al. 2013; PEREIRA et al. 2020; PEREIRA et al. 2021; PESSOA et al. 2021; SILVA & ARAUJO, 2021; MENDES, MENDES & ARAUJO; MOREIRA & ARAUJO, 2022; ARAÚJO & ARAUJO, 2023).

No que diz respeito à fundação por estacas, as incertezas podem interferir diretamente em um aspecto essencial na execução do projeto: a determinação da capacidade de carga da estaca. Para Lobo (2005) a dificuldade na determinação da capacidade de carga de estacas advém da necessidade da estimativa de propriedades do solo, das alterações causadas durante a execução da fundação e a consciência do mecanismo de interação entre o solo e a estaca. A mesma autora ainda afirma que a capacidade de carga de uma fundação está diretamente ligada às características geotécnicas do solo que está em volta da estaca e pode ser avaliada por meio de métodos teóricos ou por métodos semiempíricos. Os métodos teóricos utilizam soluções clássicas de capacidade de carga (e.g. TERZAGHI, 1943) a partir de parâmetros do solo como ângulo de atrito e coesão.

Entretanto, mesmo com várias propostas desenvolvidas, verifica-se ainda haver diversas incertezas no cálculo da capacidade de cargas, fazendo assim surgir diversos questionamentos, tal como o que

servirá de base para o presente trabalho: dentre os métodos teóricos que poderiam ser utilizados para calcular a capacidade de carga de fundação profunda do tipo hélice contínua de um determinado conjunto de dados, com base em laudos de sondagens SPT de um terreno, analisar qual apresentaria menor dispersão em relação aos resultados obtidos em campo por meio de prova de carga e se há alguma forma de diminuir os erros dos resultados obtidos.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa dos resultados obtidos por meio de métodos teóricos de previsão de capacidade de carga em relação aos resultados de capacidade de carga de um banco de dados obtido a partir de provas de cargas de fundações do tipo hélice contínua.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

Com o intuito de auxiliar na escolha da fundação há diferentes formas de agrupar os seus vários tipos, uma delas leva em conta a profundidade da ponta ou base do elemento estrutural de fundação, o que dá origem a dois grandes grupos: as fundações rasas ou superficiais, como as fundações por sapatas; e as fundações profundas, como as fundações por estacas e tubulões (CINTRA, AOKI & ALBIERO, 2011).

2.1. Estaca Hélice Contínua

Segundo Antunes & Tarozzo (1998), a estaca hélice contínua “é uma estaca de concreto moldada “in loco”, executada por meio de trado contínuo e injeção de concreto, sob pressão controlada, através da haste central do trado simultaneamente a sua retirada do terreno”.

A perfuração consiste em cravar a hélice no solo até atingir a profundidade determinada pelo projeto. Antunes & Tarozzo (1998) descrevem que assim que atingida a profundidade necessária se inicia a concretagem, sendo o concreto bombeado pelo tubo central, preenchendo simultaneamente a cavidade enquanto é extraída a hélice, até sua superfície de trabalho. Imediatamente após a concretagem, é colocada a armação em forma de gaiola, inserida por gravidade ou com auxílio de um pilão de baixa carga ou vibrador.

2.2. Capacidade de Cargas

Pereira (2020) afirma que por mais que exista, na área da Engenharia de Fundações, inúmeros métodos para estimar a capacidade de carga de fundações profundas, está ainda é uma tarefa complicada, pois, é necessário que haja uma avaliação prévia do mecanismo de transferência de carga da estaca para o solo, mecanismo que depende principalmente da metodologia de execução da estaca, heterogeneidade do solo ao longo do fuste e na ponta e os parâmetros geométricos da estaca.

O cálculo da capacidade de carga pode ser efetuado por meio de métodos estáticos, os quais são divididos em teóricos ou semiempíricos, sendo o segundo os mais utilizados no Brasil para a determinação da capacidade de carga de fundações profundas, fazendo correlações da teoria com os resultados obtidos através de ensaios de SPT (SOARES, 2014).

Shooshpasha, Hasanzadeh & Taghavi (2013) mencionam que a determinação da capacidade de carga através do SPT inclui duas abordagens principais, métodos diretos e indiretos. De acordo com

os autores, os métodos diretos aplicam valores do índice de penetração N com alguns fatores de modificação, já os métodos indiretos empregam correlações entre N e o ângulo de atrito e os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os mesmos autores ainda afirmam que os métodos diretos são os mais aceitos entre os engenheiros de campo pela facilidade de cálculos.

As fórmulas teóricas para estimativa de capacidade de cargas de fundações por estacas possuem uma gama de estudos na engenharia de fundações, com propostas diversas, devido à dificuldade de adaptar um modelo eficaz (CINTRA & AOKI, 2010).

2.3. Métodos Teóricos

As fórmulas teóricas para determinação de capacidade de carga de elementos de fundação por estacas constituem um vasto capítulo da engenharia de fundações, o interesse que o assunto desperta gerou pesquisas, contribuições teóricas e constitui um imenso repertório de fórmulas da parte de inúmeros autores, essa diversidade de proposições decorre da dificuldade de ajustar um bom modelo físico e matemático à questão da ruptura em fundações profundas (CINTRA & AOKI, 2010).

2.3.1. Método de Tomlinson

Tomlinson (2001) determina que no estado limite, a capacidade final de sustentação de uma estaca é dada pela equação (1) abaixo:

$$Q_p = Q_s + Q_b - W_p \quad (1)$$

Onde,

Q_s = resistência final do eixo na fricção da estaca;

Q_b = resistência final da base;

W_p = peso da estaca.

Em geral W_p é pequeno em relação a Q_p e muitas vezes é desprezado porque não é muito maior do que o peso do solo deslocado, no entanto, deve ser levado em consideração para estacas marinhas, onde uma proporção considerável do comprimento da estaca se estende acima do leito do mar (TOMLINSON, 2001).

Segundo o software Geo5 a resistência lateral (R_s) de uma estaca pela formulação de Tomlinson (2001) é dada por:

$$R_s = \sum_j^n \alpha_j c_{aj} \times A_{sj} = \sum_j^n \alpha_j \times c_{uj} \times A_{sj} \quad (2)$$

e a resistência de base é dada por:

$$R_b = q_b \times A_b \quad (3)$$

Onde,

c_{aj} = adesão na $j^{\text{ésima}}$ camada (tensão de cisalhamento entre a superfície da estaca e o solo envolvente);

A_{sj} = área da lateral da estaca na $j^{\text{ésima}}$ camada;

α_j = coeficiente de adesão empírico (depende do tipo de solo, tipo de estaca etc.) na $j^{\text{ésima}}$ camada;

c_{uj} = coesão não drenada na $j^{\text{ésima}}$ camada (resistência ao cisalhamento não drenada)

q_b = resistência unitária da base da estaca;

A_b = área da base da estaca.

Tomlinson (2001) explica que a resistência unitária da base da estaca pode ser obtida por correlação com testes de carregamento igual a nove vezes a resistência média ao cisalhamento no solo não drenado abaixo da base da estaca, assim o valor característico de q_b da equação 8 é $9 \times c_u$ (média) dividido por 15, este fator adicional é usado essencialmente para permitir incertezas no método de cálculo ou dispersão nos valores nos quais o cálculo foi baseado.

2.3.2. Método das Tensões Efetivas

O método da tensão efetiva através do software Geo5 permite calcular a capacidade de carga de uma estaca isolada, em solos coesivos e solos não coesivos. Este método é conveniente para condições drenadas, ou seja, condições que prevaleçam após tempo suficiente desde a construção.

A resistência lateral da estaca é dada por:

$$R_S = \sum_{j=1}^n \alpha_{s,j} q_{s,j} \times A_{s,j} = \sum_{j=1}^n \alpha_{p,j} \beta_{p,j} \times \sigma_{0,j} \times A_{s,j} \quad (4)$$

Onde,

$q_{s,j}$ É a resistência lateral na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$\beta_{p,j}$ É o coeficiente de Bjerrum e Burland na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$\sigma_{0,j}$ É a tensão efetiva média devido à formação geológica atuante ao longo da estaca na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$A_{s,j}$ É a área do poço das estacas na $j^{\text{ésima}}$ camada.

A resistência da base da estaca é dada por:

$$R_b = q_p \times A_b = N_p \times \sigma_p \times A_b \quad (5)$$

Onde,

q_p É a resistência unitária na base da estaca;

A_b É a área da base da estaca;

N_p É coeficiente de resistência da base da estaca (de Fellenius);

σ_p É a tensão efetiva à formação geológica que atua na base da estaca.

2.3.3. Método NAVFAC

No método NAVFAC DM 7.2 deve ser definido primeiramente o tipo de solo, isto é, se é uma camada de solo coesiva ou não coesiva. Para solo coesivo não drenado é necessário definir a coesão total do solo (resistência não drenada) e o fator de adesão. Este fator é determinado tendo em conta a consistência do solo, material da estaca e coesão total do solo. Já para solo não coesivo é necessário definir o ângulo de atrito superficial, que depende do material da estaca.

A capacidade de carga pelo método NAVFAC DM 7.2 através do software Geo5 consiste na soma do poço da estaca R_s com a resistência na base da estaca R_b . Para obter a condição de confiança, este valor deve ser superior ao valor da carga de projeto V_d .

A resistência da base da estaca para solos não coesivos é dada pela equação 6

$$R_b = \sigma_{efb} \times N_q \times A_b \quad (6)$$

Onde,

σ_{efb} Tensão efetiva na base da estaca;

N_q Fator da capacidade de carga;

A_b Área da base da estaca.

Para solos coesivos, é utilizada a seguinte expressão

$$R_b = 9 \times C_u \times A_b \quad (7)$$

Onde,

C_u Resistência de cisalhamento não drenada na base;

A_b Área da base da estaca.

A resistência do poço da estaca para solos não coesivos é dada por:

$$R_s = \sum_{j=1}^n K_j \times \sigma_{ef,j} \times \text{tg} \delta_j \times A_{s,j} \quad (8)$$

Onde,

K_j Coeficiente do empuxo de terra lateral na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$\sigma_{ef,j}$ Resistência efetiva do solo na $j^{\text{ésima}}$ camada;

δ_j : Ângulo de atrito da superfície da estaca (entre o material da estaca e o solo envolvente na $j^{\text{ésima}}$ camada);

$A_{s,j}$: Área do poço da estaca na $j^{\text{ésima}}$ camada.

Para solos coesivos, é utilizada a seguinte expressão:

$$R_s = \sum_{j=1}^n \alpha_j \times C_{u,j} \times A_{s,j} \quad (9)$$

Onde,

α_j : Coeficiente de atrito superficial na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$C_{u,j}$: Coesão não drenada na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$A_{s,j}$: Área do poço da estaca na $j^{\text{ésima}}$ camada.

3. METODOLOGIA

De acordo com Gil (2018) a pesquisa é um procedimento racional e sistemático que tem por objetivo conceder respostas aos problemas propostos. A pesquisa é necessária quando não se tem informação que seja suficiente para responder a um determinado problema, ou quando a informação disponível se encontra desordenada impossibilitando ser adequadamente relacionada ao problema.

A pesquisa realizada neste trabalho se classifica como quantitativa, pois segundo Tavares Filho (2020), uma pesquisa quantitativa necessita do uso de alguns recursos e técnicas estatísticas e propõe que tudo pode ser quantificável, ou seja, pode-se traduzir opiniões e informações em números para que se possa classificá-los e analisá-los, como no caso deste trabalho em que faz-se o uso de simulações

numéricas por meio do software Geo5 e comparações entre os resultados obtidos das simulações com os resultados obtidos por meio de um banco de dados. As comparações foram feitas por planilhas utilizando o Microsoft Excel® (Excel).

3.1. Simulações Realizadas

Foram feitas simulações por meio do software Geo5 do cálculo da capacidade de carga para 64 fundações do tipo hélice contínua. Os métodos de cálculo escolhidos para a obtenção de tais capacidades foram três dos analíticos, sendo eles: o método de Tomlinson, o método das tensões efetivas e o método de NAVFAC. Concluídas as simulações, seguiu-se para a análise onde foram comparados os resultados das simulações com os dados das provas de cargas, a fim de verificar estatisticamente os indicadores como: correlação, erro percentual e raiz do erro quadrático médio, avaliando a acurácia de cada método e propondo ajustes que melhoraram os resultados obtidos.

3.2. Métricas Estatísticas

De acordo com Flick (2013) na triangulação por métodos quantitativos, as métricas escolhidas devem ser consideradas como uma forma de complementar a outra, compensando seus pontos deficientes. Para Tiviños (1987), a técnica de triangulação tem como propósito básico abranger a máxima amplitude na descrição, na explicação e na compreensão do objeto em estudo. Assim optou-se por fazer uso de mais de uma métrica estatística para a análise pretendida, a fim de que se obtivesse resultados mais fidedignos e mais clareza na observação.

3.2.1. Coeficiente Correlação de Pearson

O coeficiente de Correlação de Pearson (r) é a medida estatística que dimensiona o grau de relação entre duas ou mais variáveis e pode ser definido por:

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{(n-1) \times s_x s_y} \quad (10)$$

Onde,

x_i - desvios reduzidos da variável independente ($x_i = X_i - \bar{X}$)

y_i - Desvios reduzidos da variável dependente ($y_i = Y_i - \bar{Y}$)

n - Número de valores observados

$s_x s_y$ - Desvio padrão das respectivas variáveis.

Existindo uma perfeita relação entre as variáveis o coeficiente de determinação (r^2) é igual a um (1), enquanto o de alienação é zero.

3.2.2. Erro Percentual

Para a comparação dos erros percentuais dos resultados obtidos a partir dos cálculos encontrados através de simulações no Software Geo5 com os valores obtidos através das provas de carga, temos a seguinte fórmula:

$$\text{Erro \%} = \frac{(H - \underline{H})}{H} \times 100 \quad (11)$$

Em que:

\underline{H} É o valor obtido através das simulações no Software Geo5;

H É o valor obtido das provas de carga.

3.2.3. Raiz Quadrada do Erro Médio

A raiz quadrada do erro médio representada pela equação 12, avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e estimados. Quanto menor o RMSE, melhor a precisão da estimativa, sendo a situação ótima quando é igual a zero.

$$\text{RMSE} = \frac{100}{\bar{H}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n}} \quad (12)$$

Em que:

\bar{H} É a média das simulações totais realizadas;

N É o número total de simulações realizadas.

3.3. Banco de Dados

O banco de dados utilizado é disponibilizado por Lobo (2005) composto por cerca de 400 casos para os quais se dispõe de prova de cargas e de resultados de ensaios SPT para estacas do tipo Metálica, Escavada e Hélice contínua. Para cada estaca são conhecidos, os seus índices de resistência à penetração N a cada metro, profundidade de assentamento, identificação do tipo de solo em cada camada, diâmetro da estaca. Também são conhecidas as cargas de ruptura calculadas por Lobo (2005) a partir de provas de carga realizadas para cada uma das estacas. Essas cargas de ruptura foram adotadas como valores de referência, com os quais os valores obtidos por cada um dos métodos estudados foram comparados a fim de verificar a acurácia (com base nas estatísticas citadas anteriormente). Para esse trabalho foi utilizado um subgrupo do banco de dados geral, composto por 64 estacas do tipo hélice contínua.

3.4. Software GEO5

O software GEO5 contém vários métodos para calcular a capacidade de carga de fundações por estacas. Sendo assim, a fim de atingir o resultado que se deseja, é necessário selecionar um método adequado de acordo com cada situação, considerando o tipo de estrutura e os dados disponíveis adquiridos por meio de um levantamento geotécnico.

O programa de estaca serve para verificar a capacidade de carga vertical de uma estaca carregada à tração ou compressão, o seu assentamento, assim como a capacidade de carga de uma única estaca. A análise de verificação pode ser realizada de acordo com a norma EN 1997-1 ou pelo método clássico (estados limites, fator de segurança). O programa considera os seguintes tipos de estacas: estacas cravadas, estacas escavadas, estacas de hélice contínua. Análise da capacidade de carga final e resistência ao atrito de estacas utilizando as seguintes normas e métodos: Método de Tomlinson, NAVFAC DM 7.2, Método das tensões efetivas, CSN 73 1002 e CTE-DB SE-C.

O software apresenta um banco de dados constituído por diversas normas e padrões mundiais e gera um relatório de saída, que pode ser ajustado de acordo com as necessidades do usuário.

No Geo5, uma das informações essenciais para o cálculo da capacidade de carga é o tipo de solo e os parâmetros obtidos a partir de medidas de laboratório ou levantamento geológico. Quando não há nenhuma pesquisa geológica ou experimentos laboratoriais disponíveis, o solo pode ser especificado com a ajuda

do banco de dados de solos contendo valores aproximados de características básicas.

Para a classificação do solo todos os campos de entrada do software são obrigatórios (Tabela 01), sendo que alguns parâmetros do solo não constam no banco de dados do software, como o ângulo de atrito interno e peso específico do solo saturado, neste caso devem ser atribuídos manualmente. Ainda existe o caso de não haver as características de alguns tipos de solos no banco de dados construído, nesses casos os parâmetros também devem ser definidos manualmente.

Tabela 01. Parâmetros do solo obrigatório para cada método.

PARÂMETROS	TOMLINSON	NAVFAC	TENSÕES EFETIVAS
PESO ESPECÍFICO	X	X	X
COEFICIENTE DE POISSON	X	X	X
COESÃO DO SOLO	X	X	N/A
COEFICIENTE DE CAPACIDADE	N/A	N/A	X
FATOR DE ADESÃO	N/A	X	N/A
MÓDULO EDOMÉTRICO	X	X	X
PESO VOLUMÉTRICO SATURADO	X	X	X
MÓDULO DE REAÇÃO DO SOLO	X	X	X
ÂNGULO DE DISPERSÃO	X	X	X

Fonte: Autores, 2026.

Para os solos que não constam no banco de dados do software os parâmetros foram determinados por meio de interpolações do NSPT médio da camada com o parâmetro desejado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

As simulações realizadas para as estacas hélice contínuas, apresentaram tanto valores satisfatórios quanto não (analisando cada estaca isoladamente) quando comparados com os obtidos através do banco de dados. Com a planilha finalizada, pode-se concluir qual dentre os três métodos analisados para a previsão de capacidade de carga teve as métricas estatísticas mais satisfatórias. Na tabela 02 tem-se o resumo das métricas estatísticas obtidas utilizadas para as análises. Vale lembrar que as discussões a seguir trabalham com o erro percentual em módulo.

Tabela 02. Métricas estatísticas obtidas.

MÉTODO	CORRELAÇÃO	ERRO % MÉDIO	RMSE
TOMLINSON	0,5651	46,26	1227,85
NAVFAC	0,7875	47,52	1091,53
TENSÕES EFETIVAS	0,7504	36,05	809,73

Fonte: Autores, 2026.

Com as informações e os gráficos gerados por meio das simulações, analisou-se individualmente cada um dos métodos propostos, concluindo assim o método com a melhor acurácia.

4.1. Tomlinson

O método de Tomlinson apresentou erro percentual médio igual a 46,26%, separadamente as estacas obtiverem erros tanto para mais quanto menos. Com 6 estacas com um erro percentual abaixo de 10% (em módulo), sendo que, das 6 estacas 3 demonstraram valores maiores que o real e as outras 3 estacas com valores menores. Dentre as estacas, 7 apresentaram valores entre 10% a 20%, com apenas 1 valor acima da referência. Todas as estacas com um erro percentual acima dos 20% tiveram resultados abaixo dos valores reais. As estacas com os resultados mais próximos do esperado possuem camadas de solos coesivos maiores, nesses casos o valor da coesão, parâmetro que é utilizado para calcular a capacidade de carga pode ter influenciado nos resultados.

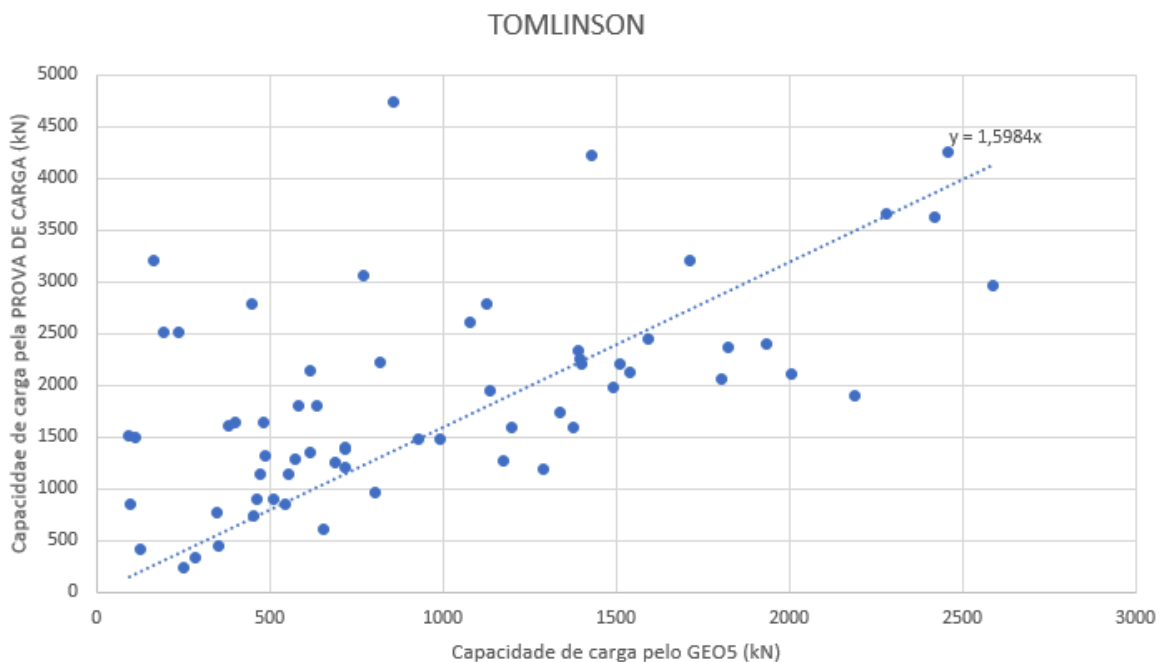
A raiz do erro quadrático médio (RMSE) se apresentou como o pior índice dos três, sendo igual a 1228,72, mesmo levando em consideração que nos três métodos o RMSE foi relativamente alto. Para essa métrica, quanto menor o valor mais preciso é o resultado, sendo 0 o ideal.

Visto que as métricas anteriores se apresentaram como as menos satisfatórias em relação aos outros métodos, era esperado que a correlação segue uma linha similar, já que a mesma representa a linearidade das variáveis e o erro entre estas foi relativamente alto. A correlação de aproximadamente 0,56 indica uma conexão moderada com os dados de referência, isso fica mais perceptível na figura 01.

Na construção gráfica para cada estaca ensaiada, foi determinado um par coordenado definido pelo valor da prova de carga e o

correspondente valor para o método teórico analisado. Os pares coordenados foram plotados em um gráfico de dispersão dado por “capacidade de carga do método via Geo5” x “capacidade de carga da prova de carga”. Na figura 01 foi identificada a reta de tendência que corresponde ao valor desejável ou satisfatório.

Figura 01. Gráfico de dispersão para o método de Tomlinson.



Fonte: Autores, 2026.

No gráfico 01 podemos observar o indício da fraca correlação na grande dispersão dos pontos e ausência de um padrão, se a correlação fosse forte a tendência era que os pontos estivessem próximos e seguindo a reta.

4.2. NAVFAC

O método de NAVFAC obteve as segundas melhores métricas, com exceção do seu erro percentual médio que foi igual a 47,52%. Das 64 estacas, apenas 2 alcançaram erros em módulo menores que 10%, uma com valor acima do esperado e outra abaixo. Observou-se que 60 estacas resultaram em subdimensionamentos, sendo 30 delas

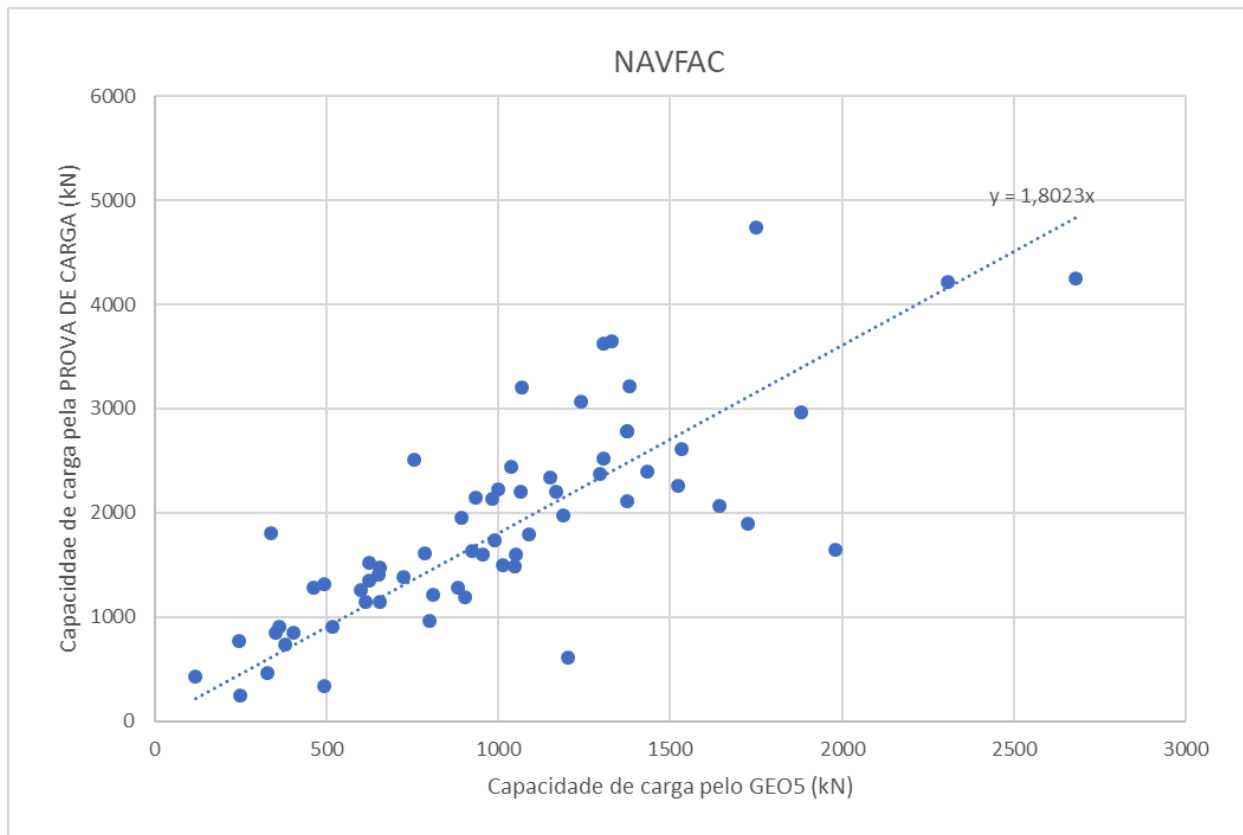
com erros altos situados entre 50% e 81%. Das 4 superdimensionadas o maior erro foi igual a 98,71%, ou seja, o resultado da capacidade de carga calculada pelo geo5 foi quase o dobro da real. Constatou-se uma variação muito alta, com nenhum padrão reconhecido. Ainda assim é um estudo válido, que deve ser levado em consideração e que permite comparações com os outros métodos, sendo as estacas utilizadas as mesmas apresentadas em todos os métodos, para melhor entendimento e clareza na divergência de resultados.

O RMSE de NAVFAC foi o segundo mais satisfatório, sendo seu valor de 1091,26, porém ainda muito distante do ideal. Um dos motivos para o RMSE ter sido alto é que conforme os erros aumentam o índice do RMSE aumenta consideravelmente, logo, quando se tem outlier no conjunto de dados, o peso desses outlier tem um peso maior para o cálculo do RMSE e, por consequência, prejudicará sua métrica tornando-a maior.

Este método se destacou em uma métrica, sendo o melhor entre os três. Se trata da Correlação, obtendo um valor de aproximadamente 0,79 o que é considerada uma correlação forte, isso quer dizer que se proposto um método de ajuste eficiente a fim de mitigar o erro, a probabilidade de acerto é grande uma vez que uma variável vai aumentar na mesma proporção da outra.

A partir dos dados gerados, fez-se a análise gráfica de desempenho onde fica mais visível a forte correlação, isto porque nota-se a proximidade dos pontos a reta de tendência (Figura 02).

Figura 02. Gráfico de dispersão para o método de NAVFAC.



Fonte: Autores, 2026.

Pelo gráfico percebe-se a influência da correlação na disposição dos pontos, apesar de alguns dispersos, a grande maioria se aproxima da reta e a segue, porém pela equação da reta $y = a \times x + b$ com o valor de $a = 1,80$ aproximadamente, vê-se que os valores das capacidades de carga pelo geo5 precisariam aumentar em 80% para que os erros fossem menores.

4.3. Tensões Efetivas

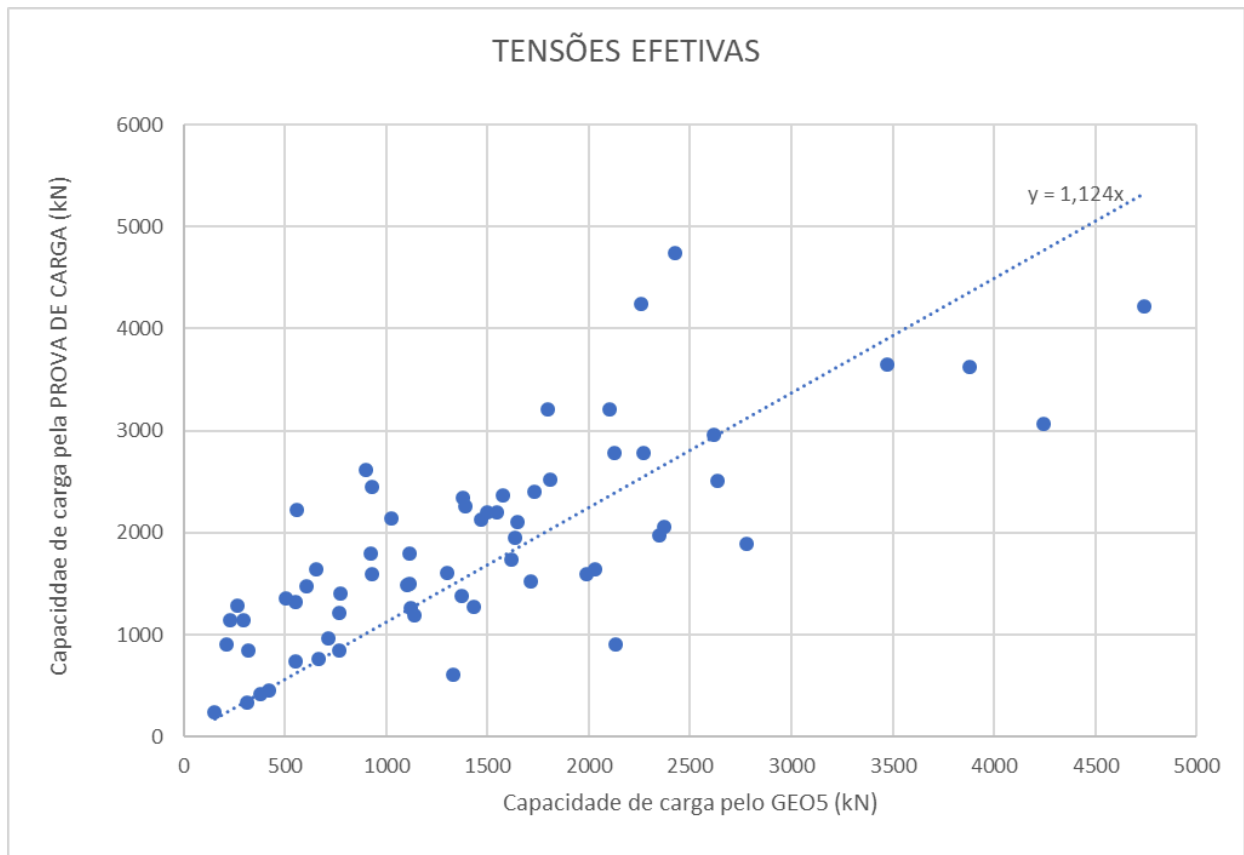
Para erro percentual médio o método das Tensões Efetivas teve os valores mais próximos do real, com uma média aproximada de 36,05% (em módulo). Pode-se observar que, 10 estacas avaliadas tiverem erros percentuais inferiores a 10%, entres essas, apenas 2 favoreceram a segurança. Em sua maioria as capacidades de cargas simuladas, assim como nos outros dois métodos, ficaram abaixo do valor de referência. Das 64 estacas simuladas para o método das

Tensões efetivas, 13 obtiveram resultados que se apresentaram acima da capacidade de carga real.

Outro ponto importante no erro percentual das tensões efetivas é que, tanto para os valores negativos quanto para os positivos, obteve-se erros percentuais maiores que 75%. Para os valores positivos o maior erro percentual foi de 136%, enquanto que os negativos o maior erro percentual foi de aproximadamente 80%. Um fato interessante é que, em sua expressiva maioria as estacas nas quais o erro ficou abaixo do erro médio, a ponta da estaca estava assentada em uma camada de solo Silto Arenoso.

Além do erro percentual, o método das tensões efetivas também obteve o melhor RMSE, sendo ele 809,73. Isso fica claro ao se analisar estaca por estaca, pois percebe-se que em relação aos outros métodos, tensões efetivas obteve menores variações.

Figura 03. Gráfico de dispersão para o método das Tensões Efetivas.



Ao analisar a figura 03 nota-se a evidência da forte correlação obtida no valor de 0,75, sendo a segunda melhor das três e fica fácil visualizar a associação entre os pares de dados, é possível identificar também que os valores simulados em sua maioria foram menores que os de referência, mas isso não implica necessariamente o valor simulado será sempre menor que o de referência uma vez que há outros fatores que determinam o resultado final de cada simulação.

Pela equação da reta determina-se o valor de ajuste de $a = 1,124$, esse valor significa que se vê que as capacidades de carga pelo geo5 precisariam aumentar cerca de 12% para se obter erros menores, apesar de que o valor de a superior próximo de 1 indica que os resultados encontrados se aproximam bem dos valores de referência.

4.4. Ajustes dos Resultados

A partir dos dados iniciais e com o intuito de melhorá-los a fim de que apresentem valores mais precisos para as capacidades de carga de cada estaca, fez-se ajustes por meio das equações da reta gerada pelo gráfico de dispersão de cada método. Os reajustes se deram pela multiplicação da variável dependente (y) de cada método pelas suas respectivas capacidades de cargas simuladas. As variáveis independentes de cada método estão apresentadas na tabela 03.

Tabela 03. Equações de ajustes proposta de cada método.

TOMLINSON	NAVFAC	TENSÕES EFETIVAS
$Y = 1,5984X$	$Y = 1,8023X$	$Y = 1,124X$

Fonte: Autores, 2026.

Assim foram calculados novos valores para a capacidade de carga, sendo feita a multiplicação dos valores antigos pelo coeficiente de ajuste de cada reta, repetindo o procedimento para as 64 estacas e em cada um dos três métodos e avaliadas novamente as métricas estatísticas para melhor observar o impacto gerado pelo ajuste proposto e a qualidade das previsões. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 04.

Tabela 04. Métricas estatísticas para métodos ajustados.

MÉTODO	CORRELAÇÃO	ERRO % MÉDIO	RMSE
TOMLINSON	0,5651	36,38	1000,51
NAVFAC	0,7875	29,6	618,59
TENSÕES EFETIVAS	0,7504	34,59	780,16

Fonte: Autores, 2026.

Percebe-se que houve redução do erro percentual médio e do RMSE para todos os métodos, contudo mais evidente para o método de NAVFAC, seguido por Tomlinson. Com relação ao erro percentual médio, o método de Tomlinson obteve um valor igual a 36,38%, uma queda de 10% se comparada à primeira análise, conservando-se a ocorrência de erros para mais ou para menos, porém o número de estacas com um erro percentual abaixo de 10% foi de 6 para 15, sendo 1 com erro igual a 0 (valor estimado foi igual ao real), 7 com valores maiores que o real e 7 com valores menores. Das 6 estacas que apresentaram valores entre 10% a 20%, apenas 1 valor ficou acima da referência. Aproximadamente 54,70% das estacas ficaram com erros abaixo do erro médio.

No método de NAVFAC o erro percentual médio foi de 42,18% para 29,60%, reduzindo em quase 13%. A notável redução dos erros se evidencia no fato de o salto das estacas que alcançaram erros menores que 10% ter ido de 2 para 18, com um equilíbrio de 9 delas sendo para superdimensionamento e 9 para subdimensionamento. Os subdimensionamentos reduziram em 39% se comparados com o número de vezes que ocorreram antes do ajuste, variando de 60 para 37 estacas, com apenas 1 delas com erro acima de 50%. Já os superdimensionamentos ocorreram 27 vezes, 5 delas superando em mais de 50% a carga de referência e a maior atingindo 258,13% de erro, essas ocorrências em especial podem ser a maior influência nos resultados das métricas estatísticas analisadas.

O erro percentual médio do método das Tensões efetivas teve uma pequena redução após o reajuste, isso se deve provavelmente ao fato do método ter o menor parâmetro de correção. A redução foi

aproximadamente de 1,46%, baixando de 36,05% para 34,59%. O número de estacas que passaram a ter erros menores que 10% saltou para 13, apenas 3 estacas a mais em relação à primeira análise. Um ponto interessante é o número de estacas que tiveram uma capacidade de carga favorável a segurança aumentou de 13 para 21 estacas. Quanto às estacas que tiveram erros percentuais acima de 75% pouca coisa mudou, na primeira análise 5 estacas tinham esse erro elevado, por sua vez na segunda análise esse número de estacas caiu para 4, sendo que na primeira análise o maior erro percentual foi da estaca 76, com uma capacidade de carga aproximadamente 139,9% acima do valor referencial e na segunda análise o erro percentual dessa mesma estaca subiu para 166,28%.

Esses resultados afetaram a variação do RMSE do método das Tensões, uma vez que essa métrica é fortemente influenciada por erros elevados. No RMSE as reduções seguiram o padrão do erro percentual médio, sendo a maior em NAVFAC, seguida por Tomlinson e Tensões efetivas respectivamente. Em NAVFAC o RMSE foi de 1091,53 para 618,59, em Tomlinson de 1228,84 para 1000,51, em Tensões efetivas 809,73 para 780,16. Percebe-se que a redução tanto dos erros quanto dos RMSE (que são diretamente proporcionais entre si), são inversamente proporcionais ao parâmetro de correção definido pela reta de ajuste.

4.5. Análise dos Outliers

Através da análise das métricas geradas após os ajustes é possível verificar que ainda há ocorrência de erros percentuais que se afastam drasticamente da média. Os valores amostrais muito elevados ou muito reduzidos, diferindo significativamente dos outros, causam uma forte alteração na análise de dados. Segundo

Lima (2013), esses valores são denominados outliers e podem ter origem a partir de um registro errado, ser de uma população distinta à que está sendo observada ou mesmo ser um valor correto, porém raro de acontecer, representando assim a inevitável variabilidade em um conjunto amostral.

Para este trabalho optou-se primeiro por realizar uma análise separada nos casos extremos, outliers, encontrados em cada um dos métodos, a fim de identificar as causas para que esses valores tenham uma diferença significativa dos demais. A partir do conjunto de dados ajustados e das fórmulas para a posição do número que representa 25% (Q_s) e 75% (Q_i), definiu-se o outlier superior e inferior para os três métodos analisados, ajudando assim a identificar os valores considerados outlier e analisá-los. Os quartis inferiores, superiores e a amplitude interquartil foram definidos respectivamente conforme as equações (13 e 14) a seguir:

$$KQ_i^{\frac{N+1}{4}} \quad (13)$$

$$KQ_s^{\frac{3*(N+1)}{4}} \quad (14)$$

$$IQR = Q_s - Q_i \quad (15)$$

onde o K representa a posição do número equivalente ao quartil e N a quantidade do conjunto de dados.

Por suas vezes os valores considerados outliers são definidos conforme a equação 16 e 17:

$$LQ_i = Q_i - 1,5 \times IQR \quad (16)$$

$$LQ_s = Q_s + 1,5 \times IQR \quad (17)$$

Tabela 05. Quartis superiores e inferiores dos erros percentuais de cada método.

TOMLINSON		NAVFAC		TENSÕES EFETIVA	
Outlier (LQ)	Outlier (Qs)	QUARTIS INFERIOR (Qi)	QUARTIS SUPERIOR (Qs)	QUARTIS INFERIOR (Qi)	QUARTIS SUPERIOR (Qs)
-81,29	56,88	-78,67	72,76	-108,15	76,11

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/analise-comparativa-de-metodos-teoricos-de-previsao-de-capacidade-de-carga-de-fundacoes-do-tipo-helice-continua?noblockage>

Fonte: Autores, 2026.

No método de Tomlinson, os valores considerados outliers muito elevados são aqueles que tiveram erros percentuais superiores a 56,88% e os outliers com valores reduzidos são os que têm erros percentuais superiores a -81,29% (Tabela 05). A estaca que mais se distanciou da média negativamente foi a estaca 62, com um erro percentual de -91,69%, a mesma possui diâmetro de 0,6m e um comprimento de 16,57m, dos quais 13m é de solo arenoso. Verificando o que há em comum entre as estacas que tiveram valores que estão a favor do fator de segurança, percebeu-se que estas estão em locais com grandes camadas de solos argilosos e siltosos, e quanto maior o comprimento da estaca maior o erro percentual.

Os outliers superiores do método NAVFAC destaca-se por apresentar os maiores erros percentuais positivos, sendo a da estaca 94 o maior com cerca de 258,13%. Assim como no método de Tomlinson, as

estacas que têm as capacidades de cargas simuladas favorecendo o fator de segurança estão em solos com grandes camadas de argila ou silte, com estacas variando entre 8m a 24m de comprimento.

O método das Tensões Efetivas possui o segundo maior erro percentual positivo, aproximadamente 166,28%. Um ponto a se destacar das estacas com erros percentuais bastante elevados a favor do fator de segurança é que as estacas citadas anteriormente estão situadas quase que predominantemente em solos arenosos e possuem os maiores comprimentos entre as estacas analisadas, algo entre 17m a 23m. Já para os outliers que ficaram muito reduzidos, com um percentual de erro acima dos -87,04%, identificou-se que em sua grande maioria pousem em sua volta solos com predominância arenoso, um fator que pode ter influenciado para esses valores não serem superestimados é a diferença entre os comprimentos das estacas que variam de 7m à 13m.

Nos métodos de Tomlinson e NAVFAC a capacidade de carga lateral leva em consideração a adesão do solo, logo, os solos com alta coesão ajudam no aumento da resistência lateral, o que pode ser constatado através das estacas com melhores métricas que estão situadas em solos com predominância de camadas argilosas e siltosas onde a coesão costuma a ser alta. Por sua vez, o método das tensões efetivas usa o coeficiente de capacidade β para o cálculo da resistência lateral, coeficiente que é mais alto para solos arenosos, justificando os resultados das capacidades de cargas serem maiores para solos predominantemente arenosos.

Seguindo as análises dos resultados, o segundo passo foi a eliminação dos outliers de cada método e uma reavaliação dos dados resultantes a fim de avaliar a influência dos mesmos no

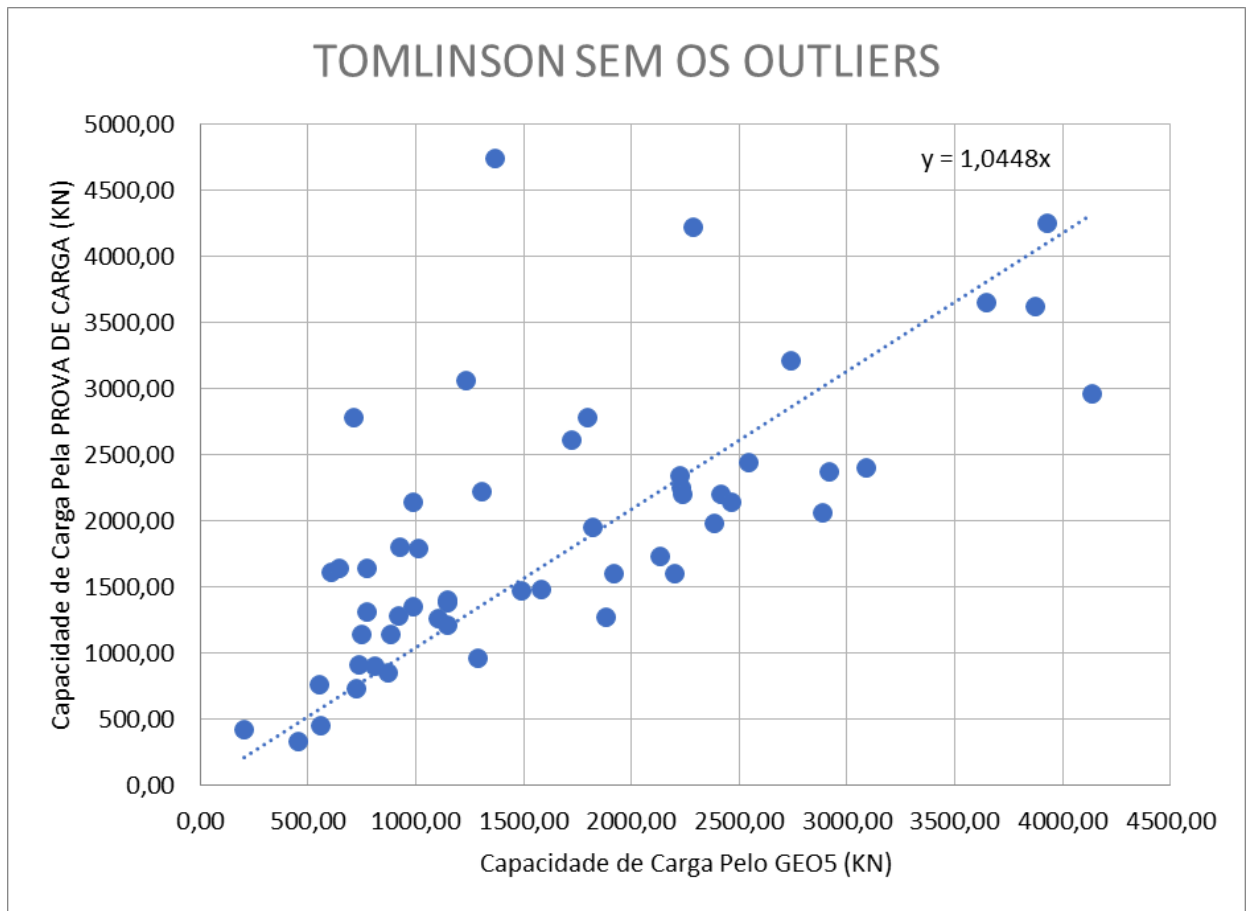
comportamento das métricas. A tabela 06 apresenta as métricas referentes a cada método após a exclusão dos outliers e já se pode perceber a notável e positiva mudança, que fica ainda mais exposta nas representações gráficas que se seguem.

Tabela 06. Métricas estatísticas para métodos, sem os Outliers.

MÉTODO	CORRELAÇÃO	ERRO % MÉDIO	RMSE
TOMLINSON	0,6799	27,45	853,23
NAVFAC	0,932	13,64	319,56
TENSÕES EFETIVAS	0,8019	29,67	724,59

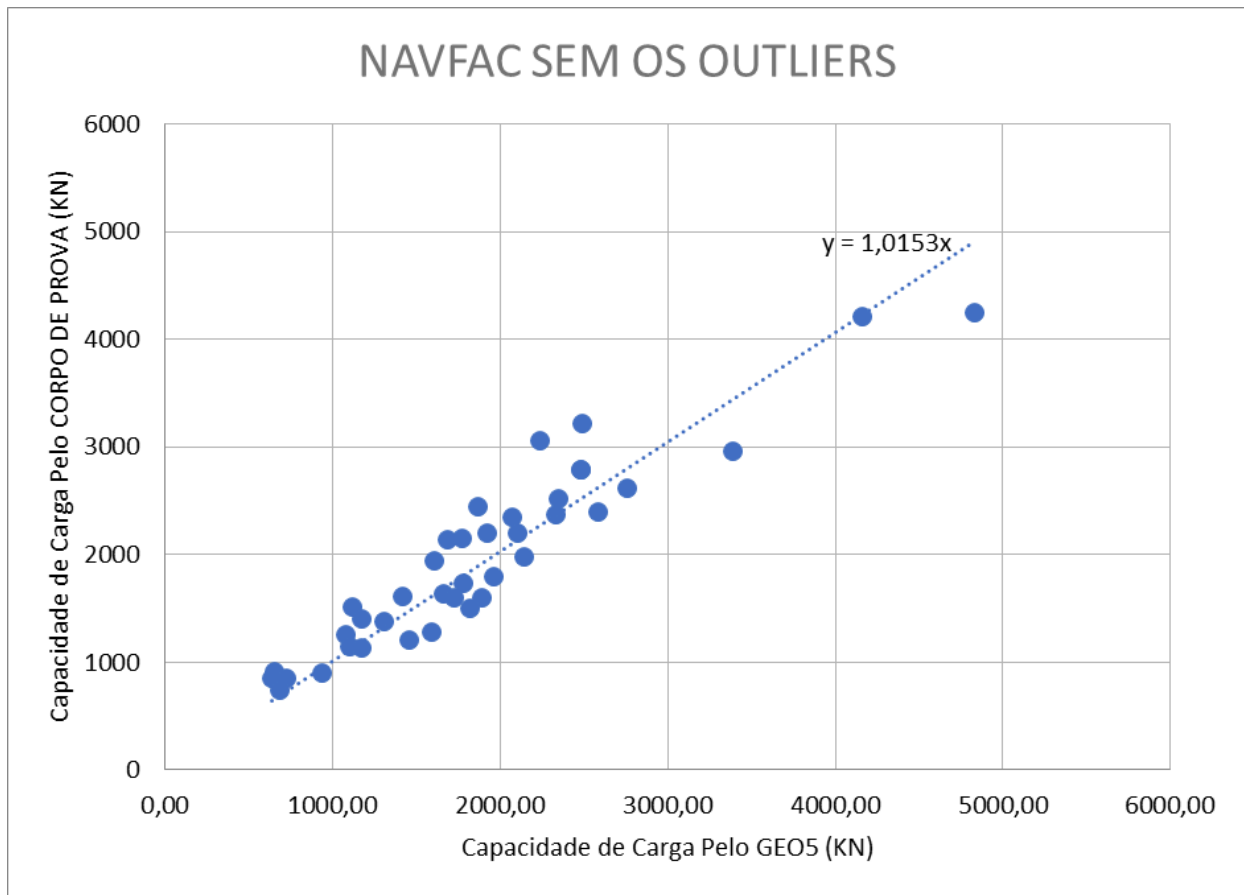
Fonte: Autores, 2026.

Figura 04. Gráfico de dispersão para o método de Tomlinson após exclusão dos outliers.



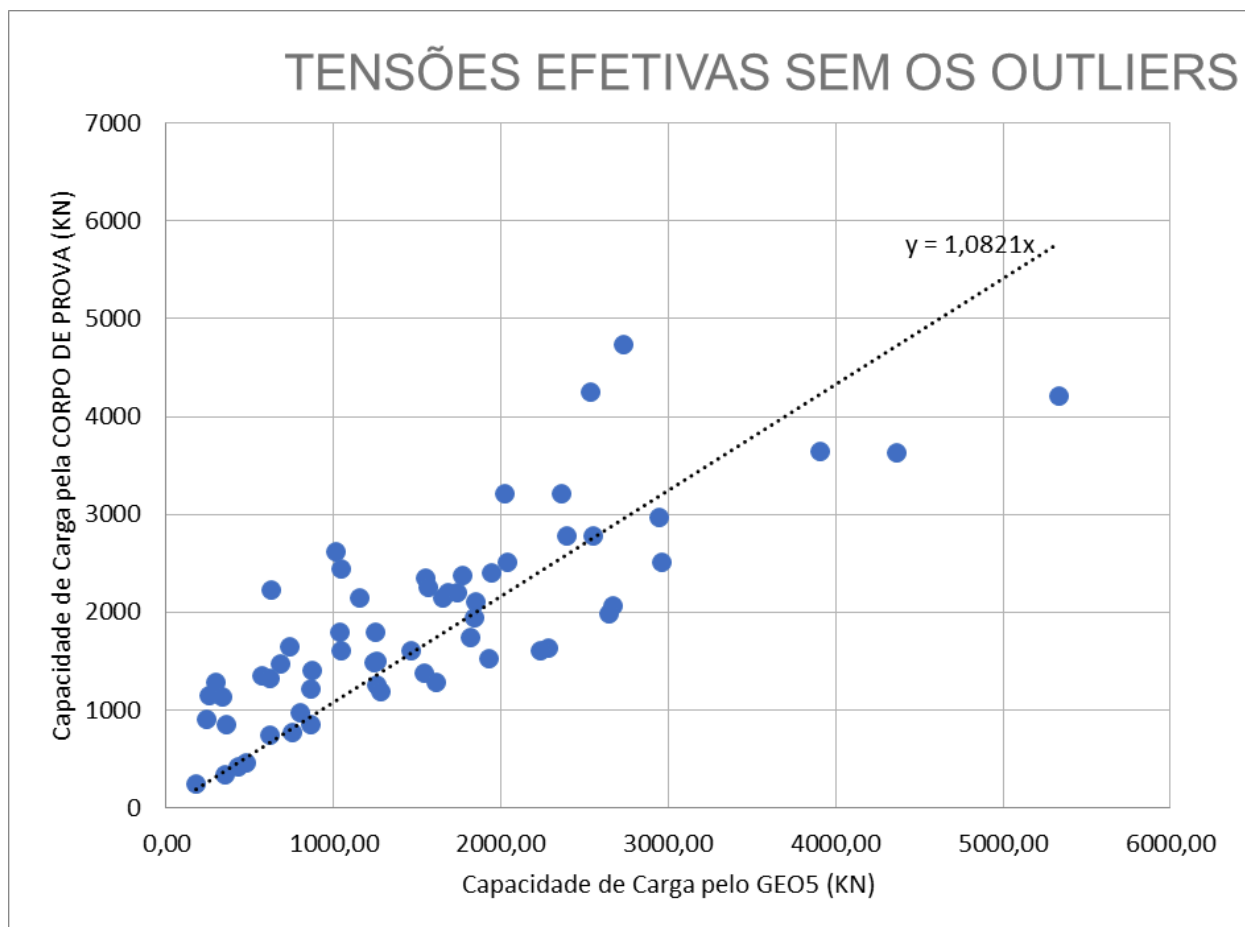
Fonte: Autores, 2026.

Figura 05. Gráfico de dispersão para o método de NAVFAC após exclusão dos outliers.



Fonte: Autores, 2026.

Figura 06. Gráfico de dispersão para o método das Tensões Efetivas após exclusão dos outliers.



Fonte: Autores, 2026.

O método de Tomlinson teve uma melhora significativa passando a ter o segundo melhor erro percentual médio. Com a correlação mais baixa entre os três métodos, dentro do intervalo que é considerada moderada, tal fato fica comprovado ao se analisar a disposição dos pontos na figura 04, que possui pontos mais dispersos da reta de ajuste, semelhante ao primeiro gráfico apresentado para este método.

O método de NAVFAC que iniciou este trabalho com o maior erro percentual médio, cerca de 47,52%, destacou-se ao finalizar com uma redução perto de 33,88% se comparado à primeira análise. Além do erro percentual médio, a correlação e o RMSE destacaram-se como os melhores, consagrando NAVFAC como o melhor dentre os três métodos para a análise proposta (Figura 05)

Por fim, o método das Tensões efetivas que apresentava as melhores métricas antes das intervenções passa agora a ser o segundo melhor método, uma vez que apresenta métricas admissíveis, com um RMSE menor que o de Tomlinson, portanto simulações mais acuradas que o mesmo e uma forte correlação dos conjuntos de dados analisados (Figura 06).

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, baseando-se nos resultados obtidos e observando-os ao longo desta pesquisa pode-se afirmar que em geral os métodos estudados apresentaram resultados aceitáveis e/ou satisfatórios, destacando-se o método de NAVFAC desde o primeiro ajuste apontado e consagrando-se como o melhor método de acordo com o estudo proposto.

Diversos fatores podem ter influenciado nos resultados obtidos, reforçando o que já vem sendo discutido pela engenharia geotécnica a respeito da dificuldade na determinação da capacidade de carga. Alonso (2010) e Lobo (2005) citam como exemplo dentre outros fatores determinantes para esse problema, a necessidade do conhecimento das propriedades dos solos para que se possa atribuir parâmetros adequados para solos distintos, afinal a capacidade de carga de uma fundação está diretamente ligada às características geotécnicas do solo que a envolve. Possivelmente a maior dificuldade desta pesquisa se deu por esse fator em particular. A ausência de um estudo geotécnico levou a uma determinação dos parâmetros dos solos baseando-se em correlações já estabelecidas, porém sem a precisão necessária, podendo isso ter resultado em situações como a ocorrência dos outliers.

O presente trabalho desenvolveu-se no intuito de avaliar a validade dos métodos já conhecidos e no propósito de observar o resultado de suas aplicações em condições diversas para que se possa determinar aquele que atenda melhor às necessidades e reduza as dificuldades existentes em torno dessa área da engenharia, mas devido a ausência de conhecimentos mais detalhados a respeito dos solos de assentamentos das estacas, as conclusões a respeito dos métodos fica limitada às condições aqui impostas.

Portanto, como sugestão para pesquisas futuras seria interessante reavaliar os métodos em outras condições, baseando-se em um estudo preliminar do solo por meio do qual se possa determinar por ensaios as características reais do solo e assim definir de forma mais precisa os parâmetros que são determinantes para os cálculos em questão e conseqüentemente atestar o método mais acurados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. A. **Análise e Projeto de Fundações Profundas: Tubulões e Caixões**. In HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1996, cap.8.2, p.302-327.

ALONSO, U. R. **Execução de fundações Profundas**. In HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998, cap.9, p.329-408.

ALONSO, U. **Exercícios De Fundações**. 2a ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2010.

ANDRADE, A. R. **Caracterização dos Elementos de Fundações Aplicáveis em Edificações na região de Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, p. 284. 2003.

ANTUNES, W. R.; TAROZZO, H. **Execução de Fundações Profundas**. In HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998, cap.9, p.329-408.

Araújo, F. S.; Araujo, R.C. **Comparação da acurácia dos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma em relação a provas de carga na obtenção da capacidade de carga de estacas tipo hélice-contínua**. Revista Brasileira De Iniciação Científica, 10, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projetos e execução de fundações**. Rio de Janeiro, p.33. 2009.

AVIZ, L. B. M. **Estimativa da capacidade de carga de estacas por métodos semi-empíricos e teóricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, p. 133. 2006.

BERBERIAN, D. **Engenharia de Fundações**. 23.ed. Brasília, UNB.1999.

BISHOP, A. W.; BLIGHT, G. E. (1963). **Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils**. Geotechnique, 13 (3), p. 177-197.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

CODUTO, D. P.; KITCH, W. A.; YEUNG, M. R. **Foundation design: principles and practices**. Third edition. Pamaona: Pearson, 2016.

DÉCOURT, L.; ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. Â. Análise e Projeto de Fundações Profundas. In HACHICH et al. (eds.). **Fundação: Teoria e Prática**. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998, Cap.8, p.265-328.

DAS, B. M. **Princípios de engenharia de fundações**. Tradução de Noveritis di Brasil. São Paulo: Cengage Learning, 2016. Título original: Principles of Foundation Engineering. 8th edition.

FALCONI, F. et al. Propriedades dos Solos. n HACHICH et al. (eds.). **Fundação: Teoria e Prática**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019, Cap. 2, p.51-118.

FELLENIOUS, B. H. **Basics of Foundation Design**. British Columbia, 2021. Disponível em: <https://www.fellenius.net/papers/412%20The%20Red%20Book,%20Basics%20of%20Foundation%20Design%202021.pdf>. Acesso em 14 de março de 2026.

FERREIRA, T. E. A. **Qualidade de projeto de edifícios vs manutenção e exploração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Aveiro. Aveiro, p.163. 2012.

FILHO, D. B. F.; JÚNIOR, J. A. S. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Universidade Federal de Pernambuco. Revista Política Hoje, Vol. 18, n. 1, 2009.

FLICK, U. **Introdução à pesquisa qualitativa**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009a.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018. GUERRINI, F. M.; BELHOT, R. V.; AZZOLINI JÚNIOR, W. **Planejamento e controle da produção: projeto e operação de sistemas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. HAWKINS, D. M.: **Identification of Outliers**. London, New York: Chapman and Hall, 1980.

HOTTMANN, C. E.; JOHNSON, R. K. **Estimation of Formation Pressures from Log-Derived Shale Properties**. Journal of Petroleum Technology, p. 717-722, June 1965.

LIMA, L. F. M.; MAROLDI, A. M.; SILVA, D. V. O. **Outlier(s) nos cálculos bibliométricos: primeiras aproximações**. Liinc em Revista, Rio de Janeiro, v.9, n.1, p.257 - 268, maio 2013.

LOBO, B. O. **Método de Previsão de Capacidade de Carga de Estacas: Aplicação dos Conceitos de Energia do Ensaio SPT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre, p. 139. 2005.

MAIA, C. M. **Execução de Fundações Profundas**. In HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998, cap.9, p.329-408.

MENDES, I. L. L.; MENDES, R. S.; ARAÚJO, R. C. **Análise comparativa das capacidades de carga de estacas pré-moldadas obtidas por métodos teóricos no software GEO5**. Research, Society and Development, v. 11, n. 15, p. 1-11, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsdv11i15.37758>

Método da Tensão Efetiva, Soluções Analíticas. **Geo5**, Software para Geotecnia e Fundações. Disponível em: <https://www.finesoftware.com.br/ajuda-online/geo5/pt/metodo-da-tensao-efetiva-01/>. Acesso em: 23 de jan. 2026.

MONTEIRO, T. M. **Análise de métodos semi-empíricos nacionais e internacionais para determinação da capacidade de carga axial em estacas tipo raiz**. Tecnologia, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 1-16, dez. 2017.

MOREIRA, T. J. S.; ARAÚJO, R. C. **Comparação das capacidades de carga de estacas pré-moldadas de concreto estimadas por meio de um método teórico e um semiempírico**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 14, n. 2, p. 77-88, 2022.

MORGENSTERN, N. R. **Managing risk um geotechnical engineering**. In: PAN AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., [s.l.], 1995.

NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMAND – NAVFAC. **Foundations and Earth Structures: Design Manual 7.02**. NAVFAC Publications Transmittal, Alexandria/VA (Estados Unidos), 1986.

NAVFAC DM 7.2, **Soluções Analíticas. Geo5, Software para Geotecnia e Fundações**. Disponível em: <https://www.finesoftware.com.br/ajuda-online/geo5/pt/NAVFAC-dm-7-2-01/>. Acesso em: 23 do ago. 2025.

NETO, L. R. **Avaliação de desempenho de fundações profundas**. Anais, Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL, Rio Grande do Sul, Pag. 153, 2002.

OLIVEIRA, S. S. J.; RODRIGUES, A. S.; MATOS, L. G. H.; YAMANAKA, F. M.; RODRIGUES, A. S.; TEIXEIRA, M. R. **Evaluation of the Susceptibility to Liquefaction of the Foundation Material of a Tailings DAM.** Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA, São Paulo (SP), v. 19, n. 8, p. e013205, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n8-067. Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/13205>. Acesso em: 10 mar. 2026.

PESSOA, A. D.; SOUSA, G. C. L.; ANJOS, G. J. M.; ARAUJO, R. C. **Analysis Over the Accuracy of Dynamic Formulas for Predicting Ultimate Load Capacity in Deep Foundations.** *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*. 79(1), p.66-88, 2021.

PEREIRA, A. B. **Análise De Desempenho De Métodos Semiempíricos De Previsão De Capacidade De Carga Geotécnica Aplicados A Estacas Pré-moldadas De Concreto Assentes Em Argila Arenosa.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 5948-5976, fev. 2020.

Pereira, A. B.; Porto, T. B.; Gomes, R. C. **Reliability and geotechnical safety applied to deep foundations in precast concrete piles – case study.** REM, Int. Eng. J., 74(1), 9-18, 2021

PINTO, C. S. **Propriedades dos Solos.** n HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019, Cap. 2, p.51-118.

RODRIGUES, R. A. **A Influência do Esgoto Doméstico Como Fluido De Saturação No Colapso De Um Solo Arenoso.** Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, p. 130. 2003.

ABENDROTH, R. E.; GREIMANN, L. F.; LAVIOLETTE M. D. **An Integral Abutment Bridge with Precast Concrete Piles.** Iowa Department of Transportation, CTRE Project 99-48. p. 72. 2007.

RODRIGUES, A. S.; YAMANAKA, F. M.; GARCIA, V. H. B.; TEIXEIRA, M. R. **Análise multidisciplinar aplicada à perícia ambiental na Foz do Rio Amazonas.** Caderno Pedagógico, [S. l.], v. 22, n. 12, p. e20899, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n12-231. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/20899>. Acesso em: 10 jan. 2026.

SILVA, F. M.; ARAÚJO, R. C. **Comparison over the Accuracy of Ultimate Bearing Capacity Predictions of an Analytical and a Semiempirical Methods.** International Journal of Science and Engineering Investigations, v. 10, issue 116, p. 1, 2021.

SILVA, L. I. **Avaliação dos métodos de previsão e controle de capacidade de carga em estacas tipo perfil metálico "H".** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro Tecnologia e Geociências. Recife, p. 218. 2013.

SILVA, G. L. **Uso De Estacas De Madeira Como Elemento Estrutural De Fundações Em Obras De Engenharia Civil No Brasil.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC, Palmas, 76°. p. 5, set. 2019.

SILVA, V. B.; RODRIGUES, A. S.; CARDOSO, A. A. A.; YAMANAKA, F. M.; MATOS, L. G. H.; SANTOS, C. A. O.; FRANÇA, C. D. V.; TEIXEIRA, M. R.

The Use of Geotechnologies in Environmental Expert Reports: an Analysis of the Application of Tools That Contribute to the Support of Environmental Expert Reports in Cases of Meteorological Disasters in Pará. Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA, São Paulo (SP), v. 19, n. 12, p. e013700, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n12-012. Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/13700>. Acesso em: 09 mar. 2026.

SHOOSHPASHA, I.; HASANZADEH, A.; TAGHAVI, A. **Prediction of the Axial Bearing Capacity of Piles by SPT-based and Numerical Design Methods.** Int. J. of GEOMATE, June, 4(2) (Sl. No. 8), p.560-564, 2013

SOARES, F. L. **Análise De Provas De Carga Dinâmica Em Tubulões A Céu Aberto No Campo Experimental De Fundações Da Eesc/Usp.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola De Engenharia De São Carlos – Universidade De São Paulo. São Carlos, p.178. 202.

SOARES, J. R. **Estimativa Da Capacidade De Carga De Estacas Escavadas De Concreto A Partir De Métodos Semiempíricos E De Ensaio De Prova De Carga Estática.** Congresso Brasileiro do Concreto, Natal, 56º, p.16, out. 2014.

TAVARES FILHO, T. E. **Metodologia da Produção Científica.** 1. ed. Manaus: MASF, 2020. TUBINO, D.F. **Planejamento e Controle da Produção:** teoria e prática. São Paulo: Atlas, 2007.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas.** In HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998, cap.7, p.227-264.

TOMLINSON, M. J.; BOORMAN, R. **Foundation design and construction**. 7th ed. Pearson Education Limited 2001.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

YAMANAKA, F. M.; RODRIGUES, A. S.; GARCIA, V. H. B.; TEIXEIRA, M. R. **Application of Electrical Resistivity Tomography with Pole-Dipole Arrangement in Environmental Expertise at the Mouth of the Amazon River**. Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA, São Paulo (SP), v. 19, n. 11, p. e013748, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n11-019. Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/13748>. Acesso em: 02 fev. 2026.

¹ Mestrando do Curso de Pós Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético da Universidade Federal do Pará – UFPA. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1146-7951>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).