

## **Análise comparativa das capacidades de carga de estacas pré-moldadas obtidas por métodos teóricos no software GEO5**

**Comparative analysis of load capacity of precast piles obtained through theoretical methods in GEO5 software**

**Análisis comparativo de las capacidades de carga de pilotes prefabricados obtenidas por métodos teóricos en el software GEO5**

Recebido: 10/11/2022 | Revisado: 17/11/2022 | Aceitado: 18/11/2022 | Publicado: 25/11/2022

**Ian Lucas Lopes Mendes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8237-7228>  
Universidade Federal do Maranhão, Brasil  
E-mail: [ian.lucas@discente.ufma.br](mailto:ian.lucas@discente.ufma.br)

**Rafael de Sousa Mendes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8766-8956>  
Universidade Federal do Maranhão, Brasil  
E-mail: [mendes.rafael@discente.ufma.br](mailto:mendes.rafael@discente.ufma.br)

**Rodrigo da Cruz de Araujo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1937-3128>  
Universidade Federal do Maranhão, Brasil  
E-mail: [araujo.rodrigo@ufma.br](mailto:araujo.rodrigo@ufma.br)

### **Resumo**

A previsão da capacidade de carga é de grande valia para o desenvolvimento de um projeto de fundação. Devido à dificuldade em determiná-la com precisão, vários métodos desenvolvidos por diferentes autores surgiram ao longo do tempo. Esta pesquisa apresenta um estudo sobre a precisão dos métodos analíticos de "NAVFAC DM 7.2", "Tensão Efetiva" e "CSN 73 1002" presentes no software GEO5 para os resultados de capacidade de carga de estacas pré-moldadas de concreto. Para a análise de desempenho, os valores de capacidade de carga geotécnica adotados como referência foram os mobilizados em ensaios de carregamento dinâmico (obtidos na literatura) realizados em 49 estacas. Esses valores foram comparados com os obtidos pelos métodos citados, medindo-se sua correlação, erros percentuais médios e erros quadráticos médios. Concluiu-se que, em geral, o método NAVFAC DM 7.2 apresentou os melhores resultados. Também foram propostos ajustes para melhorar as previsões de cada método, proporcionando resultados mais precisos.

**Palavras-chave:** Capacidade de carga; Software geo 5; Fundações profundas; Estacas.

### **Abstract**

The prediction of load capacity is of great value for the development of a foundation project. Due to the existence of difficulty in determining it accurately several methods developed by different authors have emerged over time. This research aims to compare the accuracy of the analytical methods of "NAVFAC DM 7.2", "Effective Stresses" and "CSN 73 1002" for the results of load capacity of precast concrete piles. For the performance analysis, the values of geotechnical load capacity adopted as reference were those mobilized in load tests performed in forty-nine (49) piles. These values were compared with those obtained by the mentioned methods, measuring their correlation, mean percentage errors and mean quadratic errors. It has also been proposed adjustments to improve the predictions of each method, providing more accurate results. In first predictions the percentage errors ranged from 40.8% up to 96%. After excluding outliers and proposing adjustment coefficients to be applied to each value, all the methods presented better performances, with percentage error lowering to 30.8% in best result. It was concluded that, in general, the NAVFAC DM 7.2 method presented the best results.

**Keywords:** Ultimate load capacity; Geo 5 software; Deep foundations; Piles.

### **Resumen**

La previsión de capacidad de carga es de gran valor para el desarrollo de un proyecto de cimentación. Debido a la dificultad para determinarlo con precisión, varios métodos desarrollados por diferentes autores han surgido a lo largo del tiempo. Esta investigación presenta un estudio sobre la precisión de los métodos analíticos de "NAVFAC DM 7.2", "Tensión efectiva" y "CSN 73 1002" presentes en el software GEO5 para los resultados de capacidad de carga de pilotes prefabricados de hormigón. Para el análisis de rendimiento, los valores geotécnicos de capacidad de carga adoptados como referencia fueron los movilizados en pruebas de carga dinámica (obtenidas en la literatura) realizadas

en 49 pilotes. Estos valores fueron comparados con los obtenidos por los métodos mencionados, midiendo su correlación, errores porcentuales medios y errores cuadráticos medios. Se concluyó que, en general, el método NAVFAC DM 7.2 presentó los mejores resultados. También se propusieron ajustes para mejorar las predicciones de cada método, proporcionando resultados más precisos.

**Palabras clave:** Capacidad de carga; Software geo5; Fundaciones profundas; Pilotes.

## 1. Introdução

Toda construção civil deve transferir de forma segura para o solo as cargas referentes ao seu próprio peso somadas às cargas de utilização. Isso permite que as fundações sejam definidas como a parte da estrutura responsável pelo desempenho dessa função (Cabette, 2014). De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), norma brasileira que estabelece os requisitos a serem observados para o projeto e execução de fundações, estas são classificadas em dois grupos: fundações rasas e fundações profundas. De acordo com Fellenius (2021), as fundações profundas são geralmente suportadas por estacas, que podem ser feitas de diferentes materiais e podem ter diferentes geometrias de seção transversal.

A previsão da capacidade de carga pode ser realizada por meio de métodos que podem ser teóricos, empíricos ou semi-empíricos. Um método teórico pode ser definido como aquele que se origina exclusivamente do intelecto humano quando se propõe a investigar um fenômeno observado e avaliar quais variáveis considerar em sua explicação (Neto, 1991). Um método empírico, segundo Neto (1991), é aquele que não busca nenhum raciocínio intelectual prévio, mas privilegia a observação do fenômeno para extrair informações que lhe permitirão realizar novos experimentos, controlados e modificados para a verificação e enumeração das variáveis que o influenciam. Segundo Velloso e Alonso (2000), os métodos semi-empíricos baseiam-se na análise do equilíbrio de forças e são desenvolvidas a partir dos resultados de testes "in situ", ou seja, da análise das condições do solo em seu lugar natural.

Dada a diversidade de métodos propostos por diversos autores encontrados na literatura, alguns questionamentos surgem, como quais métodos apresentam resultados mais próximos dos valores reais obtidos em testes de carga. Vários pesquisadores buscam avaliar a qualidade das previsões de capacidade de carga para estacas, obtidas por meio de diferentes métodos (por exemplo, Shooshpasha et al. 2013; Soares et al. 2014; Monteiro et al. 2017; Pereira et al. 2020; Pereira et al. 2021; Pessoa et al. 2021<sup>a</sup>; Pessoa et al. 2021b; Silva & Araujo, 2021; Moreira & Araujo, 2022).

No presente trabalho, três métodos analíticos disponíveis no software Geo5 foram usados para determinar a capacidade de carga de estacas pré-moldadas. O objetivo aqui é realizar um estudo comparativo da precisão dos resultados fornecidos por esses métodos quando comparados aos valores de testes de carga real.

## 2. Revisão Bibliográfica

### *Capacidade de Carga em Fundações Profundas*

Para projetar uma fundação é necessário verificar se a estrutura suporta as deformações em sua condição de trabalho, bem como verificar a adequação do fator de segurança da carga admissível adotada em relação ao seu rompimento geotécnico (Hachich & Nader, 1993). Segundo Das (2011) a carga por unidade de área da fundação em que ocorre a ruptura por cisalhamento no solo é denominada capacidade de carga final. Os três métodos teóricos utilizados para calcular a capacidade de carga nesta pesquisa são expostos a seguir.

### *Método NAVFAC DM 7.2*

O método é descrito detalhadamente por U.S. Department of the Navy (1984). A análise fornece a resistência de ponta  $R_b$  e a resistência lateral  $R_s$  de uma estaca (GEO5, 2020). A resistência de ponta para solos não coesivos é dada por:

$$R_b = \sigma_{efb} \cdot N_q \cdot A_b \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_{efb}$  – tensão efetiva na base da estaca;

$N_q$  - fator da capacidade de suporte;

$A_b$  - área da base da estaca.

Para solos coesivos a resistência de ponta é dada por:

$$R_b = 9 \cdot c_u \cdot A_b \quad (2)$$

Onde:

$c_u$  - resistência de cisalhamento não drenada na base.

A resistência lateral  $R_s$  da estaca para solos não coesivos é dada por:

$$R_s = \sum_{j=1}^n K_j \cdot \sigma_{ef,j} \cdot tg \delta_j \cdot A_{s,j} \quad (3)$$

Onde:

$K_j$  - coeficiente do empuxo de terra lateral na j-ésima camada;

$\sigma_{ef,j}$  - resistência efetiva do solo na j-ésima camada;

$\delta_j$  - ângulo de atrito da superfície da estaca (entre o material da estaca e o solo envolvente na j-ésima camada);

$A_{s,j}$  - área da superfície lateral da estaca na j-ésima camada.

A resistência lateral  $R_s$  da estaca para solos coesivos é dada por:

$$R_s = \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot c_{u,j} \cdot A_{s,j} \quad (4)$$

Onde:

$\alpha_j$  - coeficiente de adesão superficial na j-ésima camada;

$c_{u,j}$  – coesão não drenada na j-ésima camada;

$A_{s,j}$  - área da superfície lateral da estaca na j-ésima camada.

### **Método CSN 73 1002**

O método é encontrado no comentário da Norma CSN 73 1002 e no livro de Bazant (2014). A capacidade de carga na base da estaca é dada por:

$$P_e = m_1 \cdot m_3 \cdot A \cdot q_e \quad (5)$$

Onde:

$P_e$  - capacidade de carga na base da estaca;

$m_1$  - fator da estaca, que depende do tipo de estaca (valor tabelado);

$m_3$  - fator de carga (valor tabelado);

$A$  - área na base da estaca;

$q_e$  - fator que depende do tipo de solo e profundidade da base (valor tabelado).

A resistência lateral da estaca é dada por:

$$P_s = m_2 \cdot m_4 \cdot C_p \cdot \sum_{i=1}^n D_i \cdot q_{si} \quad (6)$$

Onde:

$m_2$  - fator da estaca, que depende do tipo de estaca (valor tabelado);

$m_4$  - fator de carga (valor tabelado);

$C_p$  - circunferência da estaca;

$D_i$  - espessura da camada de solo na i-ésima camada;

$q_{si}$  - tensão lateral na i-ésima camada (valor tabelado).

### **Método da Tensão Efetiva**

Esse método permite calcular a capacidade de carga para uma estaca isolada em solos coesivos e não coesivos. O método é indicado para condições drenadas (GEO5, 2020). A resistência lateral da estaca é dada por:

$$R_s = \sum_{j=1}^n q_{s,j} \cdot A_{s,j} = \sum_{j=1}^n \beta_{p,j} \cdot \sigma_{0,j} \cdot A_{s,j} \quad (7)$$

Onde:

$q_{s,j}$  – resistência lateral na j-ésima camada;

$\beta_{p,j}$  – coeficientes de Bjerrum e Burland na j-ésima camada;

$\sigma_{0,j}$  – tensão efetiva média devido á formação geológica atuante ao longo da estaca na j-ésima camada;

$A_{s,j}$  - área na seção da estaca na j-ésima camada.

A capacidade de carga na base da estaca é dada por:

$$R_b = q_p \cdot A_b = N_p \cdot \sigma_p \cdot A_b \quad (8)$$

Onde:

$q_p$  - resistência unitária na base da estaca;

$A_b$  - área da base da estaca;

$N_p$  - coeficiente de resistência da base da estaca (de Fellenius);

$\sigma_p$  - tensão efetiva devido á formação geológica atuante na base da estaca.

## **3. Materiais e Métodos**

No presente tópico serão descritos a tipologia da pesquisa, bem como os dados utilizados para o seu desenvolvimento, o software que foi empregado para a viabilização das análises que serão descritas e as etapas processuais da pesquisa. Em termos metodológicos, no que se refere a seus objetivos, a pesquisa pode ser classificada como descritiva, (Gil, 2007; Zanella, 2013). Considerando a proposta de Pereira et al. (2018), a pesquisa se enquadra no método quantitativo estatístico.

### **Software**

No presente trabalho, o software GEO5 foi utilizado em sua versão demonstrativa de 2021. O programa foi utilizado para obter a capacidade de carga de estacas isoladas, função que está presente no módulo de estacas. O software apresenta uma interface simples e intuitiva.

### **Descrição**

Para cada método de análise (no modo configurações) é escolhida a configuração de análise, que nada mais é do que a escolha do padrão ou região a ser aplicada no projeto. O software possui várias configurações disponíveis, incluindo uma para o Brasil. É nesta fase que o método de análise (neste caso, NAVFAC DM 7.2, Tensão Efetiva ou CSN 73 1002) é selecionado.

Para o método de análise NAVFAC DM 7.2, foram indicadas as características do perfil do solo, como profundidade, espessura da camada, peso específico ( $\gamma$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Também podem ser informados a coesão não drenada do solo ( $c_u$ ) e o fator de adesão ( $\alpha$ ) (se for um solo coeso) ou o ângulo de atrito interno ( $\varphi_{ef}$ ) (se não coeso). Em seguida, foram informadas as características geométricas da estaca (diâmetro e comprimento) e a tecnologia aplicada, ou seja, nesta etapa foi indicado ao programa que esta pesquisa trabalharia com estacas pré-moldadas.

Para o método de Tensão Efetiva, o procedimento anterior foi repetido, sendo necessário, na delimitação do solo, informar ao software um parâmetro adicional, o coeficiente da capacidade de suporte da estaca ( $\beta_p$ ) e na etapa final informar o coeficiente de capacidade de carga ( $N_p$ ). Para o método CSN 73 1002, o procedimento foi repetido, e na delimitação do solo, a coesão efetiva do solo ( $c_{ef}$ ) precisaria ser informada ao programa.

Conforme exposto, para realizar as simulações no software GEO 5 foi necessário indicar vários parâmetros referentes a cada camada de solo, de cada estaca estudada. Em alguns casos, foram utilizados os valores oferecidos pelo software, mas em outros foi necessário reunir informações sobre as correlações entre esses parâmetros do solo e os valores de NSPT (*standard penetration test*). Os resultados das capacidades de carga dos três métodos presentes no software e obtidos a partir do procedimento descrito acima foram então comparados com os respectivos valores obtidos por meio de testes de carga.

O banco de dados era composto por uma amostra de 49 estacas selecionadas aleatoriamente dentre o banco de dados apresentado por Lobo (2005), localizadas em diferentes regiões do Brasil e, conseqüentemente, em diferentes tipos de solo. Para essas estacas, tem-se disponíveis as características geométricas, ou seja, forma, comprimento, diâmetro, profundidade e material. Também estão disponíveis o perfil do solo e os valores NSPT, obtidos por meio de *Standard Penetration Tests*. Os valores da capacidade de carga utilizados como referência de comparação com as previsões dos métodos foram calculados por Lobo (2005) a partir de testes de carga.

Para verificar a precisão e segurança de cada método, ou seja, quantificar o quão próximos os resultados das simulações estão em relação aos valores de carga obtidos em campo por meio dos testes de carga, foram realizadas análises utilizando métodos estatísticos como correlação, erro quadrático, e erro percentual médio.

#### 4. Resultados e Discussão

As simulações resultaram em valores favoráveis à segurança e, em alguns casos, os resultados superestimaram os valores da capacidade de carga. A Tabela 1 contém os valores encontrados para correlação, erro quadrático médio e erro percentual em módulo para os três métodos utilizados.

**Tabela 1** - Resultados estatísticos para precisão das previsões com todas as estacas.

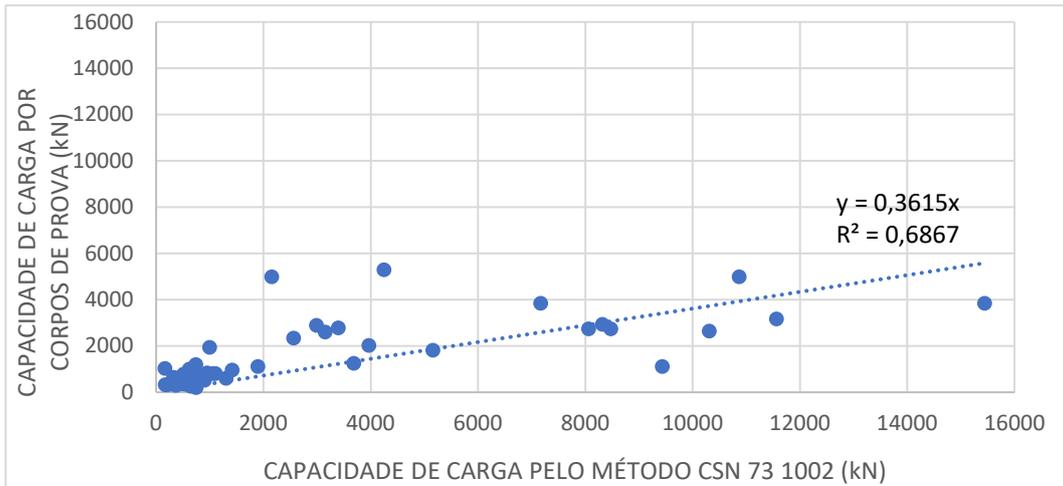
CSN 73 1002			NAVFAC DM 7.2			Tensão Efetiva		
Correlação	%Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M
0,69966165	96,77	10.283.805,89	0,578154253	40,85	1.862.497,87	0,67409307	72,01	2.783.772,406

Fonte: Autores.

O erro percentual médio mostrou-se muito elevado para o CSN 73 1002, o que pode ter ocorrido devido ao superdimensionamento dos resultados encontrados para 34 estacas das 49 analisadas, que em alguns casos originaram valores três vezes superiores ao esperado. Observou-se também que as simulações de estacas que apresentavam perfis com elevado número de camadas de solo tenderam a gerar resultados superestimados. Esse fato pode provavelmente ser justificado pelos valores dos parâmetros do solo sendo aproximados por meio de correlações com os valores NSPT, conforme mencionado anteriormente. Assim, quanto maior o número de camadas, maior o número de parâmetros a serem estipulados e, possivelmente, maior a probabilidade de erro em relação aos seus valores reais.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, foram construídos diagramas de dispersão (Figuras 1, 2 e 3) das capacidades de carga obtidas para cada um dos métodos em relação aos resultados de referência, bem como suas respectivas retas de ajuste. Foi definida a interseção da reta na origem (0,0), gerando uma equação linear do tipo  $Y = A * X$  uma vez que valores de testes de carga iguais a zero devem corresponder a previsões iguais a zero e vice-versa.

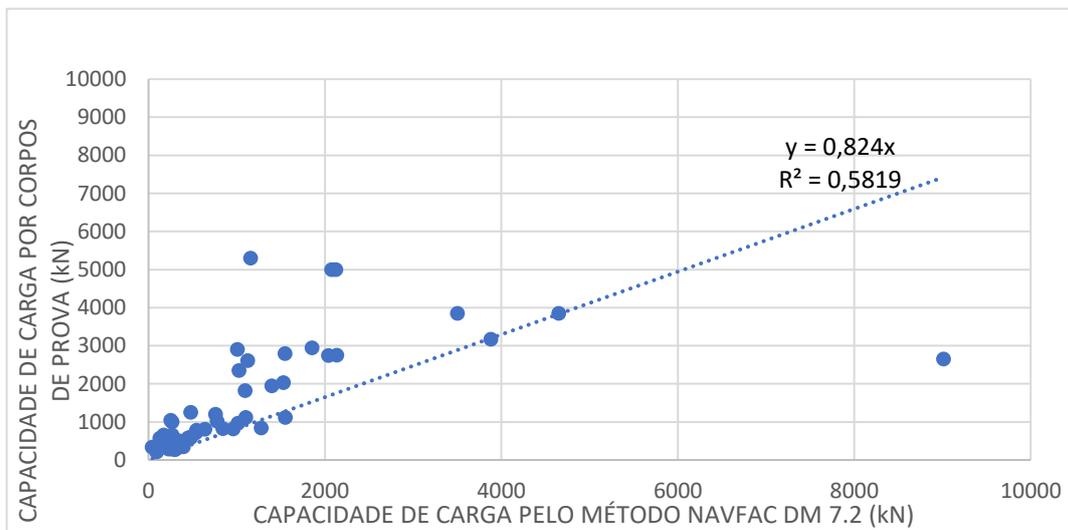
**Figura 1** - Gráfico de dispersão para o método CSN 73 1200 considerando todas as estacas.



Fonte: Autores.

Analisando a Figura 1, que apresenta os resultados obtidos para o método CSN 73 1002, é possível verificar que, em geral, os valores encontrados estão superestimados, ou seja, apresentam valores superiores aos de referência.

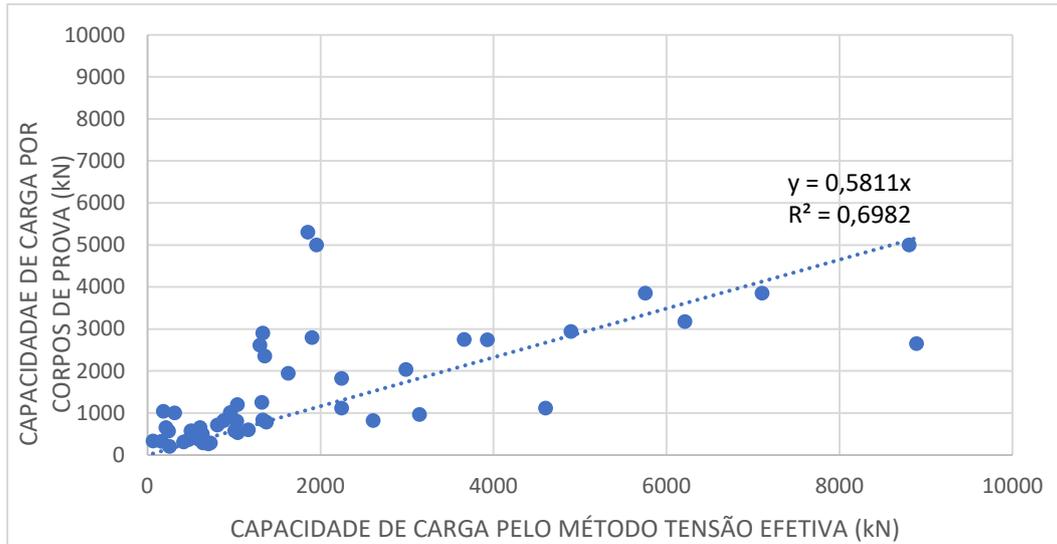
**Figura 2** - Gráfico de dispersão para o método NAVFAC DM 7.2 considerando todas as estacas.



Fonte: Autores.

Para a Figura 2, que por sua vez apresenta os resultados obtidos para o método NAVFAC DM 7.2, os resultados estão mais próximos do esperado (aquele obtidos por meio de teste de carga), uma vez que o coeficiente de ajuste está mais próximo de 1. Nota-se também que, ao contrário do método anterior, a maioria dos resultados são a favor da segurança, ou seja, com resultados estimados abaixo dos valores dos testes de carga. Porém, destaca-se uma estaca em que o resultado é superestimado, influenciando significativamente o coeficiente da reta a ser menor que 1.

**Figura 3** - Gráfico de dispersão para o método TENSÃO EFETIVA, considerando todas as estacas.



Fonte: Autores.

Para o método de Tensão Efetiva (Figura 3), verifica-se que os resultados obtidos mostram que, assim como o método CSN 73 1002, muitos dos valores encontrados para a capacidade de carga estão superestimados.

Definida a reta de ajuste, relacionando as resistências totais obtidas para cada um dos métodos em relação aos resultados de referência, foram avaliados os Coeficientes de Determinação  $R^2$  obtidos para cada uma das análises, apresentados em gráficos de dispersão. A partir desses valores, pode-se notar que se destaca o  $R^2$  obtido para os métodos CSN 73 1002 e Tensão Efetiva, ligeiramente inferior a 0,7. De acordo com Bisquerra-Alzina et al. (2004) e Devore (2006), tais resultados indicam que existe uma forte correlação entre os resultados de resistência obtidos por meio desses métodos e os resultados obtidos via ensaios de carregamento dinâmico.

O método NAVFAC DM 7.2 mostrou-se o mais conservador em seus resultados, com 38 das 49 estacas apresentando resultados abaixo dos valores de referência. Por outro lado, o método da Tensão Efetiva e CSN 73 1002 apresentaram respectivamente 17 e 15 estacas com valores que favorecem a segurança, o que representa apenas 34,69% e 30,61% das estacas.

Em relação ao erro percentual, o método CSN 73 1002 apresentou 8 estacas cujo erro na estimativa em relação ao valor de referência está em um intervalo de até 20% (para mais ou menos) e entre estas, 5 estacas com erro de até 10%, ou seja, 41 estacas apresentaram erros percentuais maiores que 20%. Cenário semelhante foi encontrado para os outros dois métodos: NAVFAC DM 7.2 com 12 estacas para erro de 20% e, entre estes, 6 estacas com erro de até 10% e Tensão Efetiva com 8 e 4 estacas com erros de até 20% e 10%, respectivamente.

Com base nos resultados iniciais e a fim de melhorá-los para que representem com mais precisão os valores das capacidades de carga finais, ajustes nos métodos foram propostos e testados. Os ajustes consistiram em simplesmente multiplicar os resultados originais pelos coeficientes correspondentes encontrados através das regressões lineares. Com isso, novos valores de capacidade de carga das 49 estacas foram calculados para os três métodos e novamente verificada a métrica estatística utilizada para avaliar a qualidade das previsões (Tabela 2).

**Tabela 2** - Resultados estatísticos para precisão das previsões ajustadas com todas as estacas.

CSN 73 1002			NAVFAC DM 7.2			Tensão Efetiva		
Correlação	% Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M
0,699661651	52,79	1.312.360,55	0,578154253	45,61	1.751.334,77	0,67409307	43,53	1.264.186,860

Fonte: Autores.

Observou-se que os valores de erro quadrático médio e erro percentual reduziram consideravelmente para os métodos CSN 73 1002 e Tensão Efetiva, em contrapartida, o erro percentual para NAVFAC DM 7,2 foi maior quando comparados aos valores anteriores ao ajuste. A possível explicação para isso é que, os dois primeiros métodos mostraram uma tendência a superestimar as capacidades de carga, de forma que a multiplicação por coeficientes menores que 1 os aproxima dos valores reais. Por sua vez, o método NAVFAC DM 7.2 em geral tende a ser conservador, de modo que o coeficiente menor que 1 (influenciado por algumas estacas excessivamente superdimensionadas) provoca um aumento do erro para as demais estacas e, conseqüentemente, do erro médio geral para o método.

Em relação ao erro percentual, o método CSN 73 1002 manteve 8 estacas cujos erros estão em um intervalo de até 20% e entre estas, 4 estacas com erro de até 10%; o NAVFAC DM 7.2 após o ajuste apresentou 10 estacas com erros de até 20% e, entre estas, 5 estacas com erros de até 10% e Tensão Efetiva apresentou 17 e 7 estacas com erros de até 20% e até 10%, respectivamente.

Em seguida, utilizou-se o método tradicional "1,5 IQR" para identificar outliers. De acordo com esta regra, após a organização de um conjunto de dados em ordem ascendente, o primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3) devem ser determinados e, com tais valores, o IQR (Q3-Q1) é determinado. Assim, a faixa inferior e a faixa superior são determinadas subtraindo  $1,5 \times \text{IQR}$  do Q1 e adicionando  $1,5 \times \text{IQR}$  no Q3, respectivamente. Os valores que estão fora desses limites são considerados outliers e excluídos das análises.

Assim, os erros percentuais obtidos em cada método foram submetidos a essa regra para identificar "erros outliers". De acordo com a regra, foi identificado um caso estranho em cada método: estaca #1 para métodos CSN 73 100 e Eficazes Stresses e estaca #37 para NAVFAC DM 7.2. Em seguida, foi realizada novamente análises semelhantes às da tabela 1, mas excluindo-as da amostra os outliers (Tabela 3).

**Tabela 3** - Resultados estatísticos para a precisão das previsões após a exclusão de estacas atípicas.

CSN 73 1002			NAVFAC DM 7.2			TENSÃO EFETIVA		
Correlação	% Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M
0,736092031	83,24%	9.056.261,69	0,754654728	37,38%	1.063.473,17	0,692933071	66,99%	2.588.400,79

Fonte: Autores.

Com base nesses resultados, é notável o aumento da correlação e diminuição do erro em todos os métodos, fato que permite constatar que as estacas atípicas influenciaram negativamente os primeiros resultados. Em seguida, os coeficientes das retas correspondentes a cada método foram apurados novamente, definindo-se novos valores para ajuste dos resultados das simulações (Tabela 4).

**Tabela 4** - Coeficientes de ajuste após a exclusão de estacas atípicas.

	CSN 73 1002	NAVFAC DM 7.2	TENSÃO EFETIVA
Coeficiente de ajustes	0,3834	1,2806	0,5989

Fonte: Autores.

A Tabela 5 mostra os resultados da correlação, erro quadrático médio e erro percentual para os valores após os ajustes realizados pelos novos coeficientes encontrados após a eliminação dos outliers. Nota-se que o coeficiente de ajuste do NAVFAC DM 7,2 passou a ser superior a 1, o que indica resultados geralmente conservadores, contribuindo para a segurança. A eliminação dos outliers não afetou significativamente os coeficientes dos outros dois métodos, uma vez que eles já apresentavam os valores mais superestimados.

**Tabela 5** - Resultados estatísticos para precisão de previsões ajustadas após a exclusão de estacas atípicas.

CSN 73 1002			NAVFAC DM 7.2			TENSÃO EFETIVA		
Correlação	% Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M	Correlação	% Erro	E.Q.M
0,736092031	48,81%	1.220.035,66	0,754654728	34,80%	908.804,2	0,692933071	41,64%	1.237.194,80

Fonte: Autores (2021).

Analisando a Tabela 5, novamente é possível verificar a considerável diminuição dos erros para os métodos CSN 73 1002 e Tensão Efetiva. Por sua vez, o método NAVFAC DM 7.2 apresenta a maior correlação e o menor erro percentual, embora não tenha sofrido uma redução dos erros tão acentuada quanto os encontrados nos outros dois métodos. Após os ajustes, verificou-se também que, para as 48 estacas analisadas, o número de resultados conservadores foi: 29 estacas pelo método NAVFAC, 39 estacas pelo método CSN 73 1002 e 33 estacas pelo método das Tensão Efetiva. Isso mostra um cenário mais equilibrado em comparação com as primeiras análises. Em relação ao erro percentual de cada estaca, o método CSN 73 1002 apresentou 10 estacas cujos erros foram em um intervalo de até 20% e destas 5 estacas com erros de até 10%; o NAVFAC DM 7.2 após a exclusão dos outliers o ajuste apresentou 18 estacas com erros de até 20% e destas 12 estacas com erros de até 10%; e “Tensão Efetiva” apresentou 15 e 6 estacas com erros de até 20% e 10%, respectivamente.

## 5. Conclusão

Com base nos resultados obtidos, é importante destacar que nas primeiras simulações os três métodos apresentaram resultados com erros significativos. As previsões do CSN 73 1002 e Tensão Efetiva são especialmente preocupantes, pois seus altos erros tendem a ser no sentido de superestimar as capacidades de carga, colocando-as contra a segurança.

Após a exclusão dos outliers e o ajuste por meio do coeficiente linear, os três métodos apresentaram melhoras significativas em seus desempenhos. Ressalta-se que nesta situação os três métodos apresentam resultados conservadores para mais de 60% das estacas analisadas. Em geral, o método NAVFAC DM 7.2 ajustado apresentou os melhores resultados após a exclusão dos outliers. O método resultou no melhor valor de correlação e menores erros, tanto percentuais quanto quadráticos. O método “Tensão Efetiva” ocupou a segunda posição nos três parâmetros utilizados com uma correlação ligeiramente superior à CSN 73 1002. Em terceiro lugar, o CSN 73 1002, que apesar de apresentar os maiores erros resultou no maior número de estacas em favor da segurança, ou seja, um número maior de resultados abaixo dos encontrados por testes dinâmicos de carregamento.

Uma das principais dificuldades enfrentadas aqui e certamente uma das principais fontes de erro nas previsões foi a determinação dos parâmetros do solo. Como afirma Alonso (2010), além da dificuldade em atribuir os parâmetros mais ade-

quados para cada tipo de solo, outras dificuldades em determinar a capacidade de carga das estacas referem-se à heterogeneidade do subsolo onde a estaca é cravada, a presença de fatores externos ou internos que modificam o movimento relativo entre o solo e a estaca, a impossibilidade prática de conhecer, com certeza, o estado de estresse do solo em repouso e estabelecer precisamente as condições de drenagem que definem o comportamento de cada uma das camadas que compõem o perfil atravessado pela estaca e o do solo onde sua ponta é apoiada.

Portanto, dependendo da análise realizada e das informações geotécnicas utilizadas, os resultados podem apresentar maiores erros, influenciando no diagnóstico da precisão do. Sugere-se aqui que novos estudos como este podem ser realizados com um maior número de estacas, com estacas de diferentes processos executivos (como escavadas ou hélice contínua) e com os outros métodos (analíticos e semiempíricos) que não foram utilizados neste estudo.

## Referências

- ABNT (2019). *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Alonso, U. R. (2010). *Exercícios De Fundações*. (2a ed.): Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo.
- Bažant, V. (2014). *Methods of Foundation Engineering: Developments in Geotechnical Engineering*. (24. ed.) Prague, Czechoslovakia: Elsevier. 616 p. v. único. ISBN 0444598057, 9780444598059.
- Bisquerria-Anzina, R., Castellá Sarriera, J., & Martínez, F. (2004). *Introdução à estatística: enfoque informático com o pacote estatístico SPSS*. Porto Alegre: Artmed.
- Cabette, J. F. (2014). *Análise dos Métodos Semi-empíricos Utilizados para a Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas Pré-fabricadas com Base em Resultados de Ensaios de Carregamento Dinâmico*. Dissertação (Mestrado). 160 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. 10.11606/D.3.2014.tde-29122014-172152.
- Devore, J. L. (2006). *Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências*. Thomson Pioneira., 706 p.
- Fellenius, B. H. (2021). *Basics of foundation design*. Electronic Edition.  
<<http://www.fellenius.net/papers/401%20The%20Red%20Book,%20Basics%20of%20foundation%20design%202020.pdf>>
- GEO5, Software (ed.) (2020). Estaca. In: *Análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada*. Fine Software.
- Gil, A. C. (2007) *Métodos e técnicas de pesquisa social*. (5a ed.): Atlas.
- Hachich, W., & Nader, J. J. (1993). *Correlações entre Parâmetros: Análise Crítica*. In: Solos da Cidade de São Paulo. São Paulo: ABMS.
- Lobo, B. de O. (2005). *Método de Previsão de Capacidade de Carga de Estacas: Aplicação dos Conceitos de Energia do Ensaio SPT*. 139 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS, Porto Alegre
- DAS, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering*. 7. ed. United States: Cengage Learning. 815 p. v. único. ISBN 978-0-495-66812-1.
- Monteiro, T. M., Araújo, C. B. C., & Aguiar, M. F. P. (2017). Análise de métodos semiempíricos nacionais e internacionais para determinação da capacidade de carga axial em estacas tipo raiz. *Revista Tecnologia*. Fortaleza, 38(2), 1-16.
- Moreira, T. J. S., & Araujo, R. C. (2022). 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*. 14(2), 77-88.
- Neto, H. N. (1991). *Filosofia básica*. São Paulo: Atual, (3ª. Ed).
- Pessoa, A. D., Sousa, G. C. L., Anjos, G. J. M., & Araujo, R. C. (2021a). 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.
- Pessoa, A. D., Sousa, G. C. L., Araujo, R. C., & Anjos, G. J. M. (2021b). Artificial neural network model for predicting load capacity of driven piles. *Research, Society and Development*, [S. l.], 10(1), e12210111526.10.33448/rsd-v10i1.11526
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Editora UAB/NTE/UFMS. Santa Maria-RS
- Pereira, A. B., Porto, T. B., Gomes, R. C., Santos, R. L. R., & Rabelo, J. M. G. (2020). 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, 6(2), 5948-5976.
- Pereira, A. B., Porto, T. B., & Gomes, R. C. (2021) Reliability and geotechnical safety applied to deep foundations in precast concrete piles – case study. *REM, Int. Eng. J.*, 74(1), 9-18.
- Silva, F. M., & Araujo, R. C. (2021). Comparison over the accuracy of ultimate bearing capacity predictions of an analytical and a semiempirical methods. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. September, 10(116).

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

Soares, J. da R., Weber, D. M., Monteiro, A. B., Wolenski, A. R. V., & Santos, R. A., (2014). Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas Escavadas de Concreto a Partir de Métodos Semiempíricos e de Ensaios de Prova de Carga Estática. *Anais Do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - Cbc2014 – 56cbc*.

U. S. Department of the Navy (1984). *NAVFAC DM 7.2*. In: Foundation and Earth Structures. Department of the Navy, Naval Facilities. Engineering Command, Alexandria, VA. 5United States.

Velloso, D. de A., & Alonso, U. R. (2010). *Previsão, Controle e Desempenho de Fundações*. In: Previsão de Desempenho x Comportamento Real. São Paulo: ABMS/NRSP.

Zanella, L. C. H. (2011). *Metodologia de Pesquisa*. (2a ed.).

<[http://arquivos.eadadm.ufsc.br/EaDADM/UAB\\_2014\\_2/Modulo\\_1/Metodologia/material\\_didatico/Livro\\_texto\\_Metodologia\\_da\\_Pesquisa.pdf](http://arquivos.eadadm.ufsc.br/EaDADM/UAB_2014_2/Modulo_1/Metodologia/material_didatico/Livro_texto_Metodologia_da_Pesquisa.pdf)>