

COMPARAÇÃO DAS CAPACIDADES DE CARGA DE ESTACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO ESTIMADAS POR MEIO DE UM MÉTODO TEÓRICO E UM SEMIEMPÍRICO

Thiago de Jesus de Sousa Moreira (UFMA) E-mail: moreira.thiago@discente.ufma.br

Rodrigo da Cruz de Araujo (UFMA) E-mail: araujo.rodrigo@ufma.br

Resumo: O cálculo da capacidade de carga é de suma importância para o desenvolvimento de um projeto de fundações, e devido a existência da dificuldade em determiná-la com precisão, ao longo do tempo surgiram vários métodos desenvolvidos por diferentes autores. Esta pesquisa apresenta um estudo acerca da acurácia de dois métodos para os resultados de capacidade de carga de estacas de concreto: Método das Tensões Efetivas e de Décourt-Quaresma. Para a análise tomou-se como valores de capacidade de carga geotécnica de referência aqueles mobilizados nos ensaios de carregamento estático (“provas de carga estáticas”) realizados em quarenta (40) estacas e comparou-se tais resultados com os obtidos pelos métodos citados. A análise dos resultados demonstra que os métodos apresentam valores de erro e correlação satisfatórios. Realizou-se também propostas de ajustes nas estimativas de modo a melhorá-las. Destaca-se que o método das Tensões Efetivas, que inicialmente apresentou pior desempenho, tornou-se o de melhores resultados após exclusão de outliers e realização de ajustes propostos.

Palavras-chave: Capacidade de carga, Software GEO5, Estacas de concreto.

COMPARISON OVER THE LOAD CAPACITIES OF PRECAST CONCRETE PILERS PREDICTED BY MEANS OF A THEORETICAL AND A SEMIEMPIRICAL METHOD

Abstract: The calculation of the load capacity is of paramount importance for the development of a project of foundations, and due to the existence of the difficulty in determining it with precision, over time several methods developed by different authors have emerged. This research presents a study on the accuracy of two methods for the results of load capacity of concrete cuttings: Effective Stresses Method and Décourt-Quaresma. For the analysis, the reference geotechnical load capacity values were those mobilized in the static loading tests performed in forty (40) piles and compared these results with those obtained by the aforementioned methods. The analysis of the results shows that the methods present satisfactory error and correlation values. Proposals were also made to adjust the estimates to improve them. It is noteworthy that the Effective Tensions method, which initially presented worse performance, became the best results after exclusion of outliers and proposed adjustments.

Keywords: Bearing capacity, Geo 5 Software, Concrete Piles.

1. Introdução

A fundação é definida como a estrutura que tem a finalidade de absorver as solicitações de carga a ela aplicada e assim transferi-las ao solo (ABNT, 2019). Segundo Falconi et al. (2016), o estudo das fundações se aprimora pela experiência, com seus comportamentos devidamente observados, e isto só é possível atentando para as peculiaridades do solo. Sendo assim, todo desenvolvimento de técnicas de projeto e de execução das fundações depende do entendimento dos mecanismos de comportamento do solo.

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), existem dois tipos de fundações: fundações superficiais e fundações profundas. Chen & McCarron (1991), afirmam que fundações superficiais são aquelas em que a sua profundidade de embutimento é menor do que sua dimensão menos característica. Em relação às fundações profundas, Fellenius (2021) define como fundações apoiadas em estacas instaladas por cravação, prensadas ou construídas in-situ.

De acordo com Lobo (2005), a previsão da capacidade de carga de estacas constitui-se em um dos desafios da engenharia de fundações por requerer, na teoria, a estimativa de propriedades do solo, suas alterações pela execução da fundação e o conhecimento do mecanismo de

interação solo-estaca. Devido à dificuldade de reproduzir analítica e numericamente o mecanismo de interação solo-estaca, a prática brasileira faz uso de relações empíricas entre os resultados do ensaio SPT e o desempenho do elemento de fundação (LOBO, 2005).

De acordo com Marcelli (2007), a escolha de uma fundação adequada, bem como a sua execução correta conforme as normas técnicas vigentes são os fatores que irão garantir a estabilidade da edificação ao longo de sua vida útil. Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), a capacidade de carga pode ser estimada por alguns métodos, como a prova de carga, por meio do ensaio de placas; por métodos teóricos; métodos empíricos e métodos semiempíricos. Os métodos teóricos são baseados em fórmulas da Mecânica dos Solos e parâmetros obtidos em ensaios de laboratório e/ou campo. Alonso (1983), afirma que a estimativa da capacidade de carga de uma estaca por meio de fórmulas teóricas normalmente não conduz a resultados satisfatórios devido aos seguintes fatores: a incerteza do estado de tensões do terreno em repouso; a dificuldade em determinar com exatidão a resistência ao cisalhamento dos solos que interessam à fundação; a influência que o método de execução da estaca exerce sobre o estado de solitação e sobre as propriedades do solo; a falta de simultaneidade no desenvolvimento proporcional da resistência de atrito e de ponta; a heterogeneidade do subsolo onde se cravam as estacas; a presença de fatores externos ou internos que modificam o movimento entre solo e estaca. Por esses motivos utilizam-se corriqueiramente os métodos semiempíricos, que são baseados em correlações empíricas com resultados de ensaios in situ e ajustados com provas de carga (Alcantara Junior et al., 2004).

Nesse contexto, são poucos os estudos sobre a aplicação dos métodos internacionais no Brasil, sendo a eficiência dos mesmos pouco testada. Ao mesmo tempo, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos para tentar comparar as estimativas proporcionadas por diferentes métodos com valores reais da capacidade de carga. Podem ser citadas como exemplo as pesquisas realizadas por: Shooshpasha et al. (2013); Soares et al. (2014); Monteiro et al. (2017); Pereira et al. (2020); Pessoa et al. (2021), Silva e Araujo (2021), Arruda Junior et al. (2021). Esses estudos são importantes para identificar quais métodos apresentam a maior acurácia, buscando aumentar a segurança no dimensionamento das fundações e a economia na execução, além de evitar o subdimensionamento ou sobredimensionamento da fundação a ser executada (MONTEIRO et al., 2017). O presente trabalho tem, então, como principal objetivo analisar a capacidade de carga de estacas pré-moldadas pelos métodos das Tensões Efetivas e Décourt-Quaresma e compará-las com resultados de provas de carga para verificar qual método apresenta maior acurácia.

2. Revisão Bibliográfica

De acordo com Cintra e Aoki (2010), a capacidade de carga do elemento isolado de fundação é representada pela máxima resistência que o elemento pode oferecer ou a carga que provoca a ruptura do sistema composto pelo elemento estrutural e o maciço de solo que o envolve. Uma fundação profunda suporta carregamentos verticais graças a sua capacidade de carga, que é composta por duas parcelas: a parcela correspondente a resistência lateral (R_l) que atua ao longo do fuste da estaca e a resistência de ponta (R_p).

Existem vários métodos para prever a capacidade de carga e o desenvolvimento dos recalques (movimento vertical descendente) dos elementos de fundação, tanto individualmente, como em grupo (MELO, 2009). Dentre os métodos de previsão existentes (estáticos, dinâmicos e provas de carga), os estáticos semiempíricos são os mais utilizados pelos projetistas de fundação no Brasil, porém a melhor forma de se analisar o comportamento de fundações profundas carregadas é a prova de carga (FRANCISCO, 2004). Conforme ressalta Tonhá e Angelim (2018), dentre os métodos semiempíricos para dimensionamento de estacas, destacam-se alguns métodos brasileiros, como o de Décourt-Quaresma (1978).

2.1. Método de Décourt-Quaresma

O método originalmente proposto por Décourt & Quaresma (1978) foi inicialmente desenvolvido para utilização em estacas cravadas desenvolvendo-se posteriormente adequações à fórmula para estacas escavadas com lama betonítica, estacas escavadas em geral, hélice contínua, estaca raiz e injetadas sob alta pressão (MONTEIRO et al., 2017). De acordo com esse método a capacidade de carga (Q_u) seria dada pela equação 1.

$$Q_u = \alpha \cdot C \cdot \overline{N}_p \cdot A_p + \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{\overline{N}_l + 1}{3} \right) \cdot U \cdot L \quad (1)$$

Onde:

U: perímetro da estaca;

L: comprimento da estaca;

C: coeficiente característico do solo (valores tabelados);

α e β : coeficientes empíricos de correção introduzidos no método por Décourt (1996), que são dados em função do tipo de estaca e de solo (tabelados);

\overline{N}_p : valor médio do índice de resistência à penetração na ponta ou base da estaca, obtido a partir de três valores: o correspondente ao nível da ponta, o imediatamente anterior (1 m acima) e o imediatamente posterior (1 m abaixo);

\overline{N}_l : valor médio do índice de resistência a penetração do SPT ao longo do fuste (independe do tipo de solo).

2.2. Método da Tensão Efetiva

O método da tensão efetiva permite calcular a capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada, tanto em solos coesivos como em solos não coesivos, sendo apropriado para condições drenadas, sou seja, que prevalecem por muito tempo após a construção (GEO5, 2021).

A resistência do fuste da estaca (R_s) é dada pela equação 02:

$$R_s = \sum_{j=1}^n q_{s,j} \cdot A_{s,j} = \sum_{j=1}^n \beta_{p,j} \cdot \sigma_{0,j} \cdot A_{s,j} \quad (02)$$

Onde:

$q_{s,j}$: resistência unitária do fuste na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$\beta_{p,j}$: coeficiente de Bjerrum e Burland na $j^{\text{ésima}}$ camada (conforme Poulos e Davis (1980), o produto entre o coeficiente de empuxo do solo e o ângulo de atrito na interface solo-estaca);

$\sigma_{0,j}$: tensão efetiva média atuante ao longo da estaca na $j^{\text{ésima}}$ camada;

$A_{s,j}$: área do fuste na $j^{\text{ésima}}$ camada

A equação 03 fornece a resistência da base da estaca (R_b):

$$R_b = q_p \cdot A_b = N_p \cdot \sigma_p \cdot A_b \quad (03)$$

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;

σ_p : tensão efetiva média atuante na base da estaca.

3. Materiais e Métodos

Para realização das estimativas de capacidade de carga foram utilizados o software GEO5 e planilhas de Excel. Partiu-se de quarenta casos reais de estacas pré-moldadas de concreto,

selecionadas aleatoriamente do banco de dados disponível em Lobo (2005). Para tais casos tinha-se: a identificação das camadas de solo; o índice SPT a cada metro; as características da estaca (comprimento, tipo de estaca, diâmetro); a carga de ruptura determinada por Lobo (2005) a partir de provas de carga. Esses dados serão utilizados para comparar os resultados das cargas determinadas por Lobo (2005) com os resultados obtidos por meio dos métodos Tensões Efetivas e Décourt-Quaresma e, assim, avaliar qual deles tem a melhor acurácia.

3.1. Métodos para Previsão da Capacidade de Carga

Dentre os diversos métodos para o cálculo da capacidade de carga de estacas, foram escolhidos dois: Tensão Efetiva e Décourt-Quaresma, sendo aplicado um por vez para cada estaca. Para cada método escolhe-se a norma ou região a ser aplicada no projeto, havendo no software uma configuração para o Brasil.

Para utilizar o método de análise Tensão Efetiva, o usuário precisa inserir no GEO5 o perfil dos solos, como profundidade, espessura da camada, peso específico, coeficiente de Poisson, e coeficiente da capacidade de suporte da estaca.

É importante ressaltar que tais parâmetros das camadas de solo não correspondiam a dados efetivamente conhecidos e determinados por meio de ensaios ou métodos próprios para isso. Desta forma, foram adotados valores estimados a partir de correlações empíricas entre tais parâmetros e os índices N_{spt} de cada camada.

O próximo passo foi informar a carga ou cargas de projetos ou serviços em seguida a forma geométrica da estaca.

Para o método de Décourt-Quaresma, a análise foi feita a partir dos dados do ensaio SPT, os quais estavam disponíveis. Em seguida adicionou-se os solos e a geometria da estaca.

Identificou-se que no software o método Décourt-Quaresma não é seguido rigorosamente conforme estabelecem os autores. Por exemplo, ao considerar os índices SPT correspondentes ao nível da ponta (N_p), o software adota diretamente o valor medido naquela profundidade, não seguindo a sugestão dos autores, que seria de calcular-se uma média de três índices (ponta, o imediatamente acima e o imediatamente abaixo). Por esse motivo, além dos resultados do GEO5 foi criada uma planilha no Excel e o cálculo da capacidade de carga foi feito fielmente conforme os autores sugerem e assim comparou-se a diferença que isso resultou.

Na etapa seguinte, conforme mencionado, foram analisados os resultados de capacidade de carga dos dois métodos e comparados com os valores de capacidade de carga obtidos por Lobo (2005) por meio de provas de carga. A análise foi feita usando métodos estatísticos disponíveis na literatura, como correlação, erro quadrático, erro percentual, e erro percentual médio (em módulo) pelos quais foi verificada a acurácia dos dois métodos em relação aos resultados de campo.

3.2. Métodos Estatísticos

a) Correlação

Em probabilidade e estatística, correlação, dependência ou associação é qualquer relação estatística (causal ou não causal) entre duas variáveis e é também qualquer relação dentro de uma ampla classe de relações estatísticas que envolva dependência entre duas variáveis (BUSSAB & MORETTIN, 2010).

Um dos coeficientes de correlação mais conhecidos é o coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 04), obtido pela divisão da covariância de duas variáveis pelo produto dos seus desvios padrão e sensível a uma relação linear entre duas variáveis.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{sx} \right) \left(\frac{y - \bar{y}}{sy} \right) \quad (04)$$

b) Erro Quadrático Médio

Segundo Kay (1998), em estatística, o erro quadrático médio (EQM) ou risco quadrático de um estimador θ para N amostras é definido por (Equação 05):

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2 \quad (05)$$

O erro quadrático médio é muito útil na comparação de estimadores, principalmente se um deles for viciado. Se os dois estimadores são não-viciados, o estimador mais eficaz é simplesmente aquele com a menor variância.

c) Erro Percentual

Bennett e Briggs (2005) dizem que o erro percentual é a diferença entre um valor medido ou experimental e um valor teórico ou conhecido, dividido pelo valor conhecido, multiplicado por 100% (Equação 06). Para muitas aplicações, o erro percentual é sempre expresso como um valor positivo. O valor absoluto do erro é dividido por um valor teórico e fornecido como uma porcentagem (BENNETT e BRIGGS, 2005).

$$E\% = \frac{(\text{valor teórico} - \text{valor experimental})}{\text{valor teórico} \times 100\%} \quad (06)$$

4. Resultados e Discussões

As simulações resultaram em valores tanto favoráveis a segurança quanto, em alguns casos, foram menores que os valores da capacidade real. O método Tensão Efetiva obteve a melhor correlação das três (Décourt-Quaresma GEO5, Décourt-Quaresma Excel e Tensão Efetiva), com Décourt-Quaresma GEO5 na pior colocação nesse quesito. O erro quadrático médio também se apresentou o mais elevado para o método Tensão Efetiva, com Décourt-Quaresma Excel apresentando o menor valor. No primeiro momento, em relação ao erro percentual médio, Tensão Efetiva apresentou o maior erro, seguido por Décourt-Quaresma Excel e Décourt-Quaresma GEO5 com o erro mais baixo. Esses dados podem ser vistos na Tabela 01.

Tabela 01: Correlações, erros percentuais médios e erros quadráticos.

Décourt Quaresma Excel			Décourt Quaresma GEO5			Tensão Efetiva		
Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M
0,7635575	36,25	860,63	0,687865	35,38	957,63	0,83076	42,51	1388,21

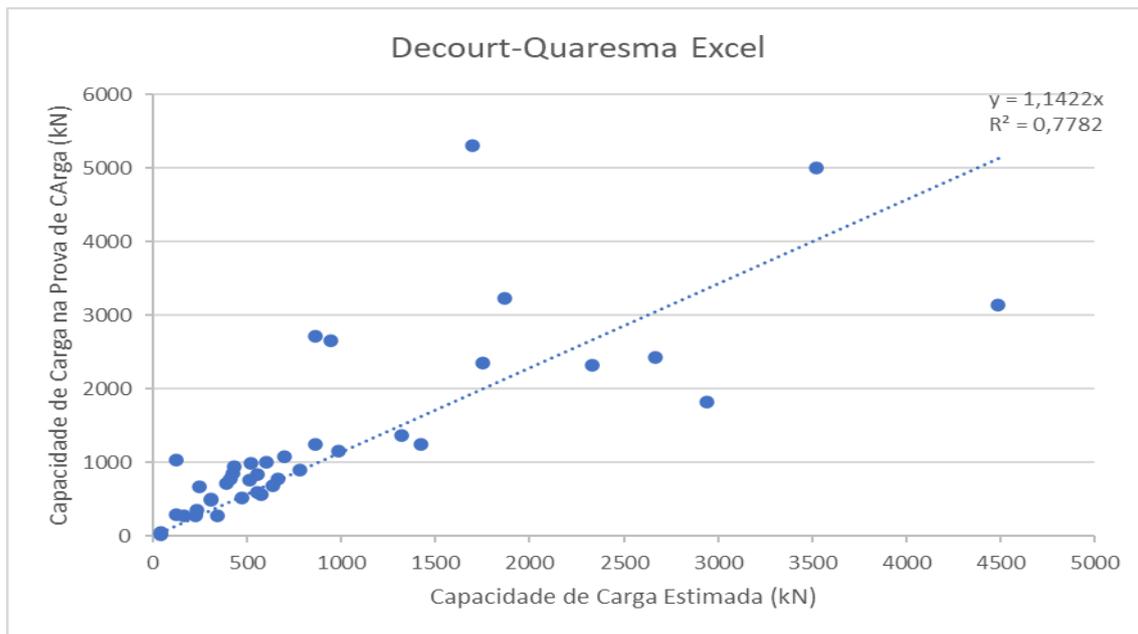
Fonte: Autor, 2022.

O erro percentual médio se mostrou maior no método de Tensão Efetiva, igual a 42,51%, o que pode ter se dado devido ao superdimensionamento dos resultados encontrados correspondentes a 27 das 40 estacas analisadas, que em alguns casos apresentaram valores três vezes maiores que o esperado. Um aspecto verificado foi que as estacas com resultados mais superestimados apresentavam areia siltosa em sua camada na cota de ponta da estaca, fato especialmente evidenciado no método Tensão Efetiva.

A partir dos resultados obtidos das simulações, foram construídos os gráficos de dispersão (Gráfico 01, 02, 03) das capacidades de carga totais, obtidas para cada um dos métodos e para cada uma das estacas ensaiadas, bem como suas respectivas retas de ajuste, em relação aos resultados de referência (aqueles obtidos via ensaio de carregamento estático). Definiu-se a interseção da reta na origem (0,0), gerando uma equação linear do tipo $Y = A * X + B$ com B

igual a zero.

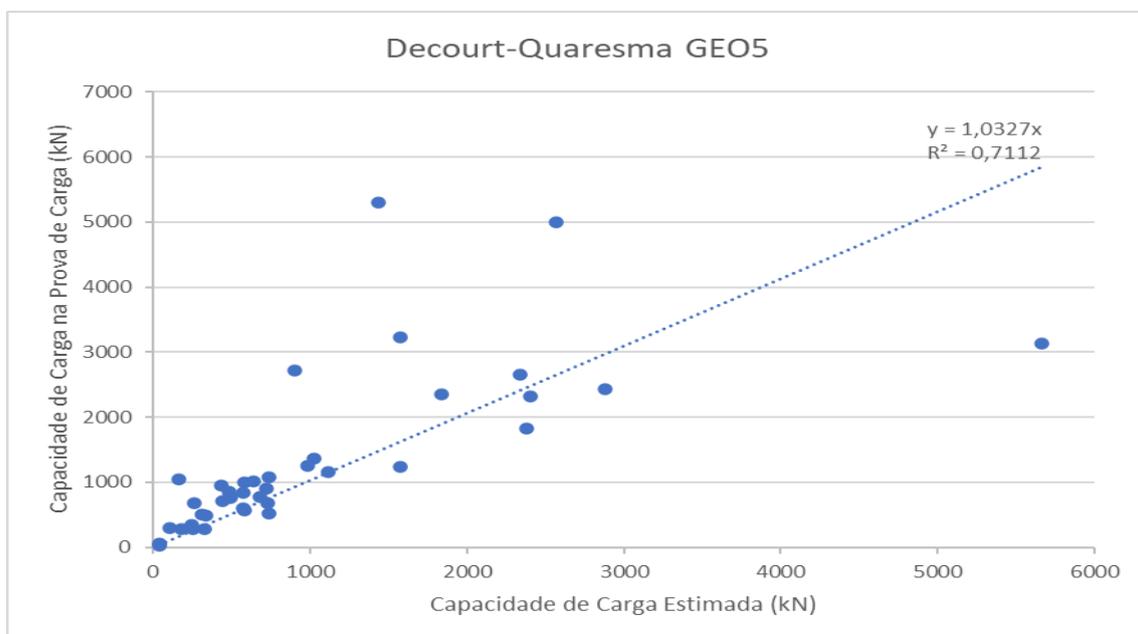
Gráfico 01: Gráfico de dispersão para o método Décourt-Quaresma Excel.



Fonte: Autor, 2022.

Analisando o Gráfico 01, o qual apresenta os resultados obtidos para o método Décourt-Quaresma Excel, é possível verificar que de modo geral os valores encontrados se aproximam bem dos valores de referência, isso se deve ao fato do coeficiente de ajuste ser superior próximo de 1. O fato desse coeficiente ser ligeiramente maior que a unidade indica resultados, em geral, conservadores, contribuindo para a segurança.

Gráfico 02: Gráfico de dispersão para o método Décourt-Quaresma GEO5.

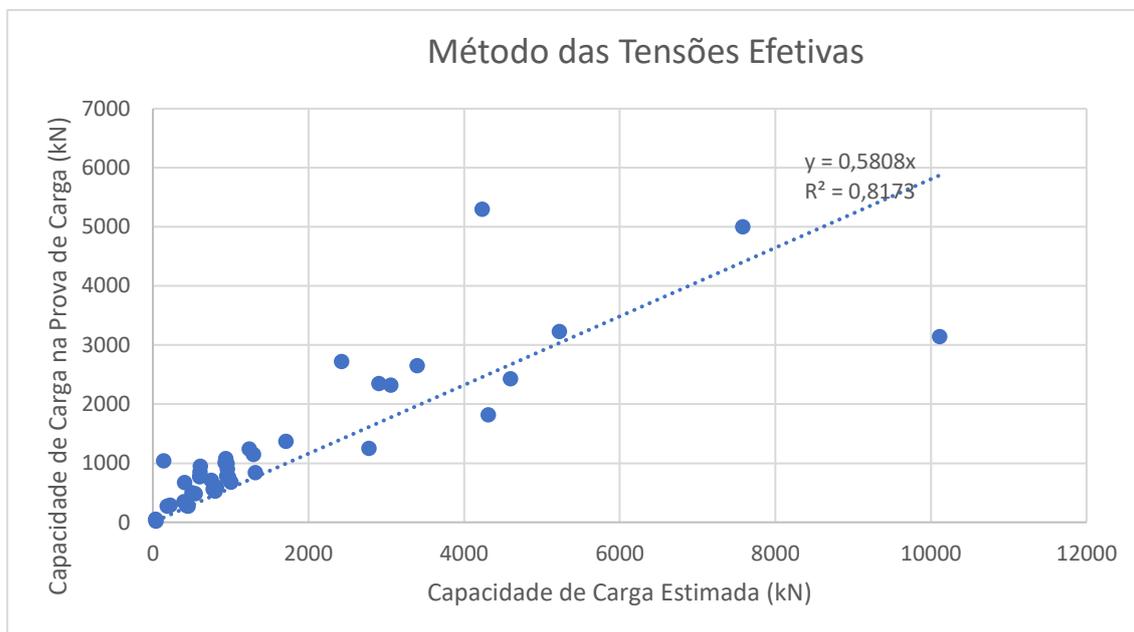


Fonte: Autor, 2022.

Para o Gráfico 02, que por sua vez apresenta os resultados obtidos para o método Décourt-Quaresma GEO5, os resultados se apresentam mais próximos aos esperados, uma vez que o coeficiente de ajuste é bem mais próximo de 1.

Para o método Tensão Efetiva (Gráfico 03) verifica-se que os resultados obtidos apresentam valores para capacidade de carga, em sua maioria, superdimensionados, ou seja, maiores que os valores de referência.

Gráfico 03: Gráfico de dispersão para o método Tensão Efetiva.



Fonte: Autor, 2022.

O método Décourt-Quaresma tanto pelo Excel como pelo GEO5 se mostrou ser bem conservador em seus resultados, favorecendo a segurança, com 32 e 30 das 40 estacas, respectivamente, apresentando resultados abaixo dos valores de referência, por outro lado Tensão Efetiva apresentou 13 das 40 estacas com valores que favorecem a segurança, o que representa apenas 32,5% das estacas analisadas.

Em relação ao erro percentual, o método Décourt-Quaresma pelo Excel apresentou 12 estacas cujos erros em termos absolutos foram de até 20% e dentre estas, 6 estacas com erro de até 10%, ou seja, 28 estacas apresentaram erros percentuais superiores a 20%. Para o mesmo método, porém utilizando o software, 10 estacas para erro de 20% e dentre estas 6 com erro de 10%, sendo assim, 30 estacas apresentaram erros percentuais superiores a 20%. Já no método Tensão Efetiva, obteve-se 11 estacas para erro de 20% e dentre estas 6 com erro de 10%, sendo assim, 29 estacas apresentaram erros percentuais superiores a 20%.

Com base nos resultados iniciais e a fim de melhorá-los para que representem de forma mais acurada os valores para capacidade de carga de cada estaca, elaborou-se ajustes com base na equação da reta gerada na regressão linear. As equações de ajuste são apresentadas na Tabela 02.

Tabela 02: Equações de ajustes propostas para os métodos.

	Décourt Quaresma Excel	Décourt Quaresma GEO5	Tensão Efetiva
Equação de ajuste	$y = 1,1422x$	$y = 1,0327x$	$y = 0,5808x$

Fonte: Autor, 2022.

Com isso foram calculados novos valores de capacidade de carga das 40 estacas para os três métodos e novamente verificadas as métricas estatísticas utilizadas para avaliar a qualidade das previsões, cujos resultados são apresentados na Tabela 03.

Tabela 03: Correlações, erros percentuais médios e erros quadráticos para os métodos ajustados.

Décourt Quaresma Excel			Décourt Quaresma GEO5			Tensão Efetiva		
Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M
0,7635575	34,05	838,144	0,687865	34,91	956,46	0,83076	36,473	760,59

Fonte: Autor, 2022.

Observou-se que os valores de erro quadrático médio e erro percentual médio reduziram em todos os métodos, porém mais acentuadamente no método Tensão Efetiva.

Em relação ao erro percentual, o método Décourt-Quaresma tanto pelo Excel como pelo software GEO5, apresentaram uma estaca a mais para a faixa de erro absoluto de até 20%, 12 e 11 estacas de 40 respectivamente, e ambos permaneceram com 6 estacas para erro de até 10%. Já o método Tensão Efetiva apresentou uma estaca a menos para erro de até 20%, agora com 10 de 40 estacas, e duas estacas a menos para erro de 10%, agora com 4 de 40 estacas.

Analisando os gráficos de dispersão dos métodos anteriormente apresentados, foram identificadas estacas com erros muito elevados e uma estaca com erro muito baixo, as mesmas foram excluídas, com destaque para a estaca 33 que no método Tensão Efetiva apresentou um erro de 222,12%.

Dessa forma, foi feita uma análise para identificar as estacas consideradas outliers, Tukey (1977) definiu o conceito de outliers via boxplots, que é um dos jeitos mais simples de se detectar outliers de forma visual para uma variável. A metodologia consiste na identificação via quartis. Dado que o quartil de 25% (Q1) é o valor em que 25% dos dados estão abaixo dele e o quartil 75% (Q3) é o valor onde 25% dos dados estão acima desse valor, determina-se o Range Inter-quartil (IQR - Inter-quartile range) por meio da diferença entre eles ($IQR = Q3 - Q1$). A partir daí, determina-se os limites inferior por $f1 = Q1 - 1,5 * IQR$ e o superior por $f3 = Q3 + 1,5 * IQR$, admitindo-se como outliers os valores que recaírem fora de tais limites.

As estacas que apresentaram erros fora do limite aceitável, foram consideradas outliers e foram removidas, com isso, foi realizada a mesma análise a fim de verificar o quanto esses valores interferem no erro médio final. A Tabela 04 exibe os novos resultados obtidos após a exclusão dos outliers.

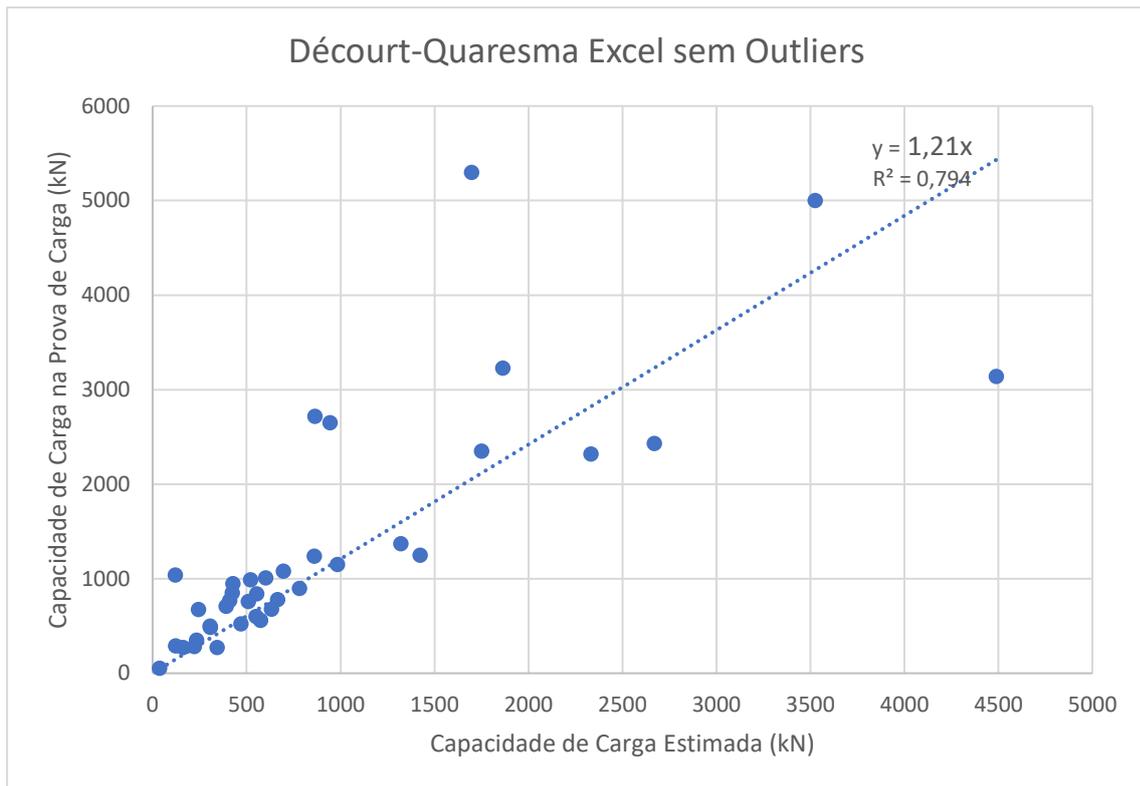
Tabela 04: Correlações, erros percentuais médios e erros quadráticos após a exclusão dos outliers.

Décourt Quaresma Excel			Décourt Quaresma GEO5			Tensão Efetiva		
Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M
0,7797765	34,04	864,008	0,74440	32,66	893,10	0,9342	27,74	650,22

Fonte: Autor, 2022.

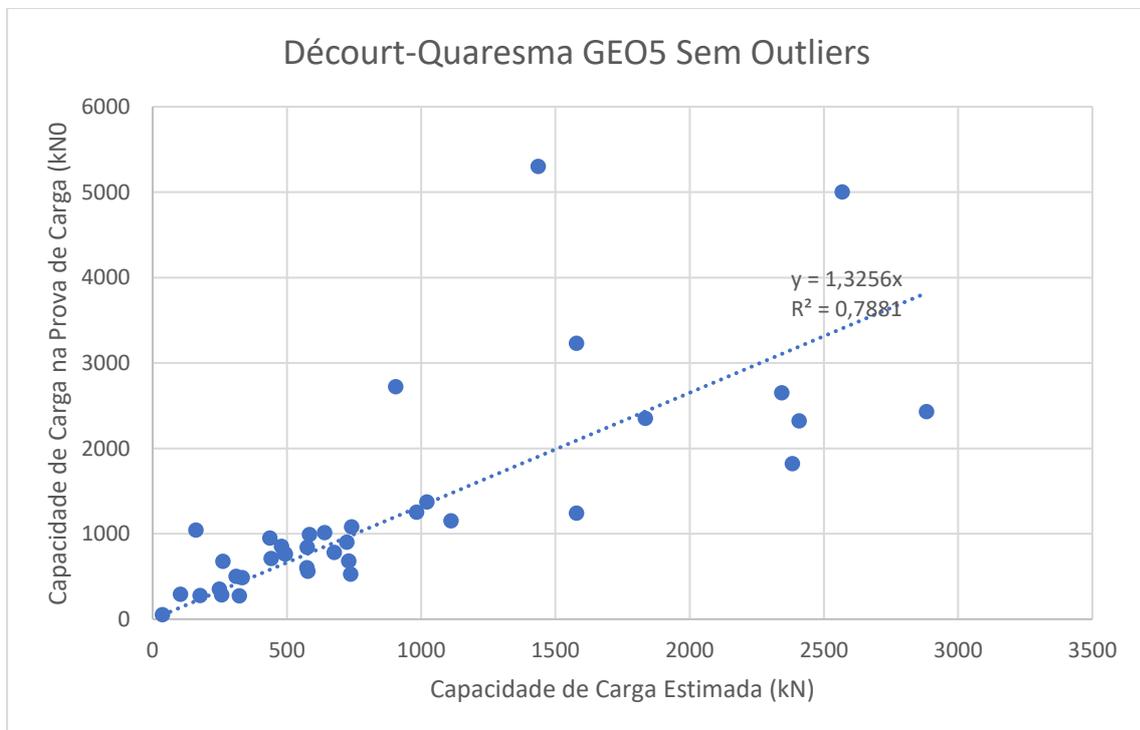
É notável o aumento da correlação e a diminuição do erro em ambos os métodos, fato este que possibilita afirmar que as estacas mais fora da reta influenciaram negativamente os resultados. Dessa forma, novamente foram gerados gráficos de dispersão para os três métodos (Gráficos 04, 05 e 06) a partir dos quais foram verificados os coeficientes das retas que se ajustariam aos pontos para cada método, definindo-se daí novos valores para ajuste dos resultados das simulações.

Gráfico 04: Gráfico de dispersão para Décourt-Quaresma Excel após exclusão de outliers.



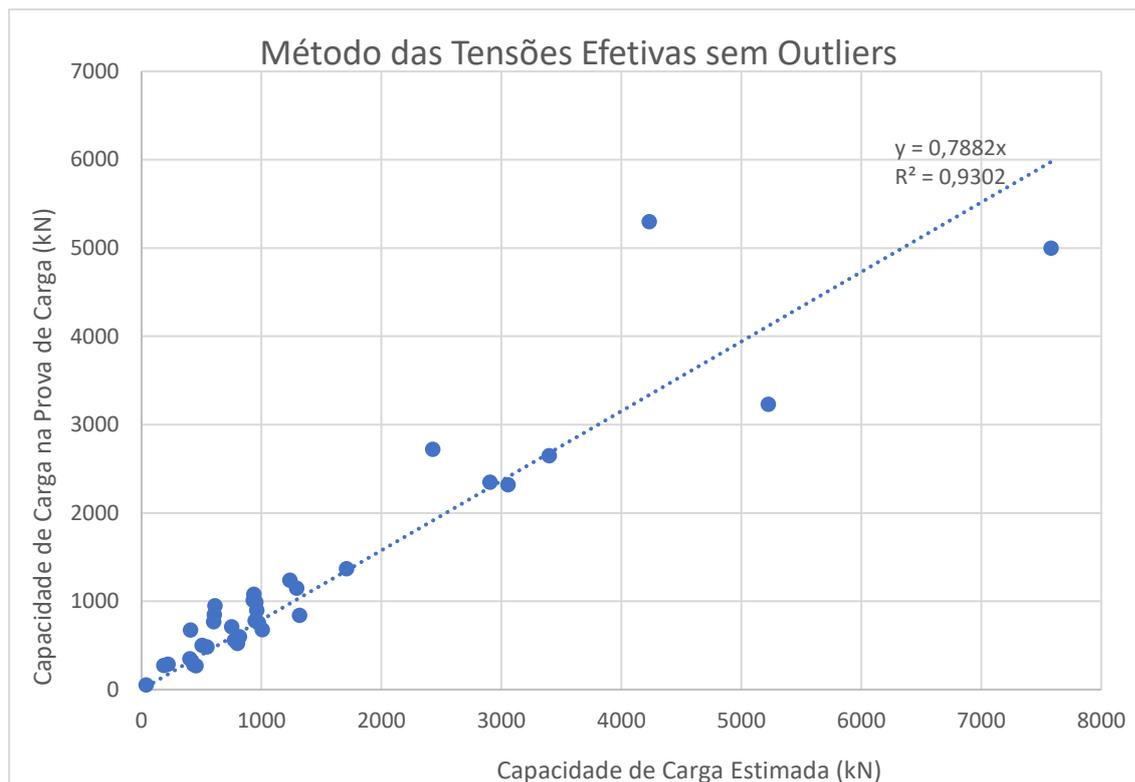
Fonte: Autor, 2022.

Gráfico 05: Gráfico de dispersão para Décourt-Quaresma GEO5 após exclusão de outliers.



Fonte: Autor, 2022.

Gráfico 06: Gráfico de dispersão para o Método das Tensões Efetivas após exclusão de outliers.



Fonte: Autor, 2022.

Na Tabela 06 são exibidos os resultados de correlação, erro quadrático médio e erro percentual para os valores após ser realizado o ajuste com os novos coeficientes encontrados apresentados na tabela 05 eliminando os outliers.

Tabela 05: Equações de ajustes propostas para os métodos após exclusão dos outliers.

	Décourt Quaresma Excel	Décourt Quaresma GEO5	Tensão Efetiva
Equação de ajuste	$y = 1,21x$	$y = 1,3256x$	$y = 0,7882x$

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 06: Correlações, erros percentuais médios e erros quadráticos para os métodos ajustados após exclusão dos outliers.

Décourt Quaresma Excel			Décourt Quaresma GEO5			Tensão Efetiva		
Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M	Correlação	Erro % médio	E.Q.M
0,7797230	29,945000	817,76	0,74440	30,873295	807,13	0,9342	22,39568	464,09

Fonte: Autor, 2022.

Analisando a Tabela 06, novamente é possível perceber uma diminuição nos erros para ambos os métodos. Observa-se ainda que para as 38 estacas analisadas, pelo método Décourt-Quaresma pelo Excel, 25 apresentam resultados conservadores, já pelo GEO5, somente 22. Já para o método de Tensões Efetivas, 22 estacas das 34 analisadas, apresentam resultados conservadores. Um cenário bem mais equilibrado se comparado com as primeiras análises. Em relação ao erro percentual, o método Décourt-Quaresma pelo Excel apresentou 13 estacas cujo erro está em um intervalo de 20% para mais ou para menos e destas, 6 estacas com erro de 10% para mais ou para menos, o Décourt-Quaresma pelo GEO5 após o ajuste e eliminando os outliers apresentou 18 estacas para erro de até 20% e destas, 10 estacas para erro de 10% e Tensão Efetiva com 13 e 8 estacas para erros absolutos de até 20% e 10%, respectivamente.

De maneira geral o método Tensão Efetiva apresentou os melhores resultados após a exclusão dos seis outliers que acabavam induzindo a erros maiores no restante da amostra. O método resultou no melhor valor de correlação e menores erros, tanto percentuais quanto quadrático. O método Décourt-Quaresma pelo Excel ocupou a segunda posição em todos os três parâmetros utilizados com correlação ligeiramente superior ao mesmo método utilizando o software, e resultou na maior quantidade de estacas a favor da segurança, ou seja, uma maior quantidade de resultados abaixo daqueles encontrados por ensaios de carregamento dinâmico.

5. Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos é possível afirmar que os dois métodos abordados apresentam resultados relativamente consistentes, com valores satisfatórios de correlação e erros, com o Método da Tensão Efetiva sendo o responsável pela melhor correlação após a eliminação das estacas outliers que induziram a erros maiores no restante da amostra. Os dois métodos apresentaram resultados conservadores para mais de 57% das estacas analisadas após a correção.

Importante ressaltar que uma das maiores dificuldades do uso dos métodos teóricos na prática de engenharia e que também se fez presente nesse trabalho é a estimativa dos parâmetros do solo. Sabe-se de antemão que as correlações disponíveis na literatura entre tais parâmetros e resultados de ensaios como o SPT, utilizadas nesse trabalho, são tentativas de aproximações que por si só já representam alto grau de incerteza. Nesse contexto, os elevados erros iniciais do Método da Tensão Efetiva e a identificação de que os outliers em geral se referiam a estacas cujas pontas se apoiavam em areias siltosas é um indicativo de que a causa destes erros pode decorrer justamente das aproximações adotadas especificamente para tal tipo de solo. Tal verificação reforça a dificuldade de uso de métodos analíticos na prática e corrobora a aplicação de métodos semiempíricos.

Portanto, dependendo da análise realizada e as informações geotécnicas utilizadas, os resultados podem apresentar erros majorados influenciando em um diagnóstico errôneo para a acurácia dos métodos utilizados. É interessante que, assim como este, novos estudos possam ser realizados com uma maior quantidade de estacas, ou até mesmo com diferentes processos executivos, como estacas escavadas ou hélice contínua abrangendo os demais métodos que não foram utilizados neste trabalho e comparando-os com métodos semiempíricos corriqueiramente utilizados pela comunidade geotécnica.

Referências

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2019.
- ALCANTARA JUNIOR, A. P.; CONCIANI, W.; FERREIRA, A. V.; BEZERRA, R. L. *Comparação entre o resultado de provas de carga e previsões com métodos empíricos e teóricos*. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA V, SEFE, 2004 São Paulo/SP. Anais... v.2, p. 37- 47, 2004.
- ALONSO, U. R. *Exercícios De Fundações*. 1a ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1983.
- ALONSO, Urbano Rodriguez. *Exercícios De Fundações*. 2a ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2010.
- ARRUDA JUNIOR, E. S.; MOREIRA NETO, A. G.; SANTOS, C.J.B.M & ALENCAR JUNIOR, J.A. *Análise Comparativa Ensaio de Carregamento Dinâmico e Estático com Métodos de Cálculo Semiempíricos: Um Estudo de Caso com Perfis Metálicos em Edifícios Altos*. Revista Engenharia e Tecnologia, V. 13, N.4, 2021.
- BENNETT, J & BRIGGS, W. *Using and Understanding Mathematics: A Quantitative Reasoning Approach* (3rd ed.), Boston: Pearson, 2005.
- BUSSAB, W.O. & MORETTIN, P. A. *Estatística Básica*. 6ª ed. [S.l.]: Saraiva. p. 73. 540 páginas, 2010.

- CHEN, W.F. & MCCARRON W. O.** *Bearing Capacity of Shallow Foundations*. Structural Engineering Department School of Civil Engineering, Purdue University, USA, 1991.
- CINTRA, J. C. A. & AOKI, N.** *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- DÉCOURT, L.** *Análise e projeto de fundações profundas: estacas*. In: HACHICH et al. (eds). *Fundações: Teoria e Prática*. São Paulo: Pini, p.265-301, 1996
- DÉCOURT, L. & QUARESMA, A. R.** *Capacidade de Carga de estacas a Partir de Valores de SPT*. 6º Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, anais, v. 1, pp 45-53, 1978.
- FALCONI, F.; CORRÊA, C. N.; ORLANDO, C.; SCHIMDT, C.; ANTUNES, W.R.A.; ALBUQUERQUE, P.J.; HACHICH, W. & NIVAMA, S.** *Fundações Teoria e Prática*. 3ªed. São Paulo. Oficina de Textos, 2016.
- FELLENIUS, B.H.** *Basics of foundation design*. Electronic Edition, January 2021.
- FRANCISCO, G.** *Estudos dos efeitos de tempo em estacas de fundação em solos argilosos*. 210f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- GEO5**, Software In: *Software Geotécnico*. 2021. [S. l.]: Fine Software, 2020. Disponível em: <https://www.finesoftware.com.br/software-para-geotecnia/>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- KAY, S. M.** *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection theory*. Prentice-Hall PTR, 1998.
- LOBO, B. O.** *Método de Previsão de Capacidade de Carga de Estacas: Aplicação dos Conceitos de Energia do Ensaio SPT*. Orientador: Schnaid, Fernando. Co-Orientador: Odebrecht, Edgar. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2005.
- MARCELLI, M.** *Sinistros na construção civil: Causas e soluções para danos e prejuízos em obras*. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2007.
- MELO, N. B.** *Análise de provas de carga à compressão à luz do conceito de rigidez*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- MONTEIRO, T. M.; ARAÚJO, C. B. C. & AGUIAR, M. F. P.** *Análise de métodos semiempíricos nacionais e internacionais para determinação da capacidade de carga axial em estacas tipo raiz*. *Revista Tecnologia*. Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 1-16, dez. 2017.
- PEREIRA, A. B.; PORTO, T. B.; GOMES, R. C.; SANTOS, R. L. R. & RABELO, J. M. G.** *Análise de desempenho de métodos semiempíricos de previsão de capacidade de carga geotécnica aplicados a estacas pré-moldadas de concreto assentes em argila arenosa*. *Braz. J. of Develop*, Curitiba, 2020.
- 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)* Volume 79, No 1, pp 66-78, 2021.
- POULOS, H.G. & DAVIS, E.H.** *Pile Foundation Analysis and Design*. New York: Wiley, 1980.
- SHOOSH PASHA, I.; HASANZADEH, A. & TAGHAVI, A.** *Prediction of the Axial Bearing Capacity of Piles by SPT-based and Numerical Design Methods*. Babol Noshirvani University of Technology, Iran, 2013.
- SILVA, F. M. & ARAUJO, 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*. September, Vol.10, Issue 116, 2021.
- SOARES, J. R.; WEBER, D. M.; MONTEIRO, A. B.; WOLENSKI, A. R.V. & SANTOS, R. A.** *Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas Escavadas de Concreto a Partir de Métodos Semiempíricos e de Ensaio de Prova de Carga Estática*. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto CBC, outubro, 2014.
- TONHÁ, A. C. F. & ANGELIM, R. R.** *Capacidade de Carga de Fundações e Verificação de Recalques a partir de Parâmetros do Ensaio Panda 2 e de outros Ensaios in Situ*. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*. Vol. 14 - nº 1, 2018.
- TUKEY, J.W.** *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1977.