

COMPARAÇÃO DA ACURÁCIA DOS MÉTODOS DE AOKI-VELLOSO E DÉCOURT-QUARESMA EM RELAÇÃO A PROVAS DE CARGA NA OBTENÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS DO TIPO HÉLICE-CONTÍNUA

COMPARISON OF THE ACCURACY OF THE AOKI-VELLOSO AND DÉCOURT-QUARESMA METHODS IN RELATION TO LOAD TESTS IN OBTAINING THE LOAD CAPACITY IN HELIX PILES

COMPARACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS DE AOKI-VELLOSO Y DÉCOURT-QUARESMA EN RELACIÓN CON LOS ENSAYOS DE CARGA EN LA OBTENCIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN PILAS DE BARRENA CONTINUA

Flávio Soares Araújo¹
Rodrigo da Cruz de Araújo²

Resumo: A previsão da capacidade de carga de estacas ainda representa dificuldades e incertezas no meio geotécnico. Este trabalho traz uma comparação entre os tradicionais métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma, buscando definir qual apresenta melhor desempenho para estacas hélice-contínua. Foram estimadas as capacidades de carga pelos métodos propostos para um conjunto de 40 estacas (para as quais dispunha-se de resultados de provas de carga). A partir da análise estatística concluiu-se que apesar de ambos apresentarem valores de correlação e erro aceitáveis em relação aos valores de referência, de modo geral, o método de Décourt-Quaresma mostrou-se superior.

Palavras-chave: Capacidade de Carga. Fundações. Métodos semiempíricos. Geo5. Estaca hélice contínua.

¹ Graduado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Maranhão. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1572-0233>. E-mail: eng.flavio Soares@gmail.com.

² Doutor em Desenvolvimento Socioambiental (UFPA). Docente da Universidade Federal do Maranhão. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1937-3128>. E-mail: araujo.rodriigo@ufma.br.

Abstract: Predicting the load capacity of piles still represents difficulties and uncertainties in the geotechnical environment. This work brings a comparison between the traditional methods of Aoki-Velloso and Décourt-Quaresma, seeking to define which presents better performance for continuous-auger piles. The bearing capacities were estimated by the proposed methods for a set of 40 piles (for which results of load tests were available). Based on the statistical analysis, it was concluded that although both presented acceptable correlation and error values in relation to the reference values, in general, the Décourt-Quaresma method was superior.

Keywords: Load Capacity. Foundations. Semi-empirical methods. Geo5. Continuous flight auger piles.

Resumen: La predicción de la capacidad de carga de los pilotes aún representa dificultades e incertidumbres en el entorno geotécnico. Este trabajo compara los métodos tradicionales de Aoki-Velloso y Décourt-Quaresma, buscando definir cuál presenta mejor desempeño para pilotes de barrena continua. Las capacidades portantes fueron estimadas por los métodos propuestos para un conjunto de 40 pilotes (para los cuales se disponía de resultados de pruebas de carga). Con base en el análisis estadístico se concluyó que, si bien ambos presentaron valores aceptables de correlación y error con relación a los valores de referencia, en general, el método Décourt-Quaresma fue superior.

Palabras-clave: Capacidad de carga. Cimientos. Métodos semiempíricos. Geo5. Hélice-pilote continuo.

Submetido 26/01/2023

Aceito 25/09/2023

Publicado 10/10/2023

Introdução

Segundo a NBR 6122 (2019) fundações são elementos da subestrutura de uma edificação, cujo objetivo é transmitir as cargas oriundas da superestrutura ao solo. São divididas em dois tipos: fundações superficiais (rasas ou diretas) e fundações profundas. Segundo Décourt (1998, p. 265) as estacas (tipo de fundação profunda) usuais podem ser classificadas em duas categorias: estacas de deslocamento (cravadas sem retirada de solo) ou estacas escavadas (com retirada de material).

De acordo com Alonso (1991, p. 8) a segurança de uma fundação, que é a capacidade que apresenta em suportar as cargas que lhe são impostas, por ser um conceito qualitativo, necessita de métodos que permitam quantificá-la. Dentre os atributos mais importantes a serem quantificados em estacas e demais tipos de fundações, rasas e profundas, tem-se a capacidade de carga.

A capacidade de carga em estacas que, segundo Décourt (1998, p. 265), é definida como a soma das cargas máximas que podem ser suportadas pelo atrito lateral e pela ponta, pode ser obtida através de provas de carga, métodos teóricos e métodos semiempíricos. Ainda segundo os autores, a utilização dos métodos teóricos na prática da engenharia de fundações acaba por ser muito restrita, pelo fato de a maioria dos parâmetros do solo necessários para essa análise ser de difícil ou quase impossível obtenção. Por outro lado, as correlações entre as tensões correspondentes a estados-limites de ruptura e dados de resistência à penetração, obtidas de forma semiempírica, apresentam boas probabilidades de acerto (DÉCOURT, 1998, p. 273). Como relata Alonso (1991, p. 59), o primeiro método semiempírico para a estimativa da capacidade de carga, proposto por Aoki-Velloso, surgiu em 1975 e, desde então, surgiram vários autores seguindo a mesma linha de raciocínio, dentre eles, Decourt-Quaresma em 1978.

Segundo Pinto et al. (1998, p. 51) “os solos são muito distintos entre si e respondem de maneira muito variável, por isto, toda experiência transmitida pelas gerações de construtores sempre se relaciona ao tipo de solo existente”.

Nesse contexto, vários estudos vêm sendo feitos acerca da comparação entre os métodos de cálculo da capacidade de carga, a exemplo de: Moreira e Araújo (2022), comparando um método teórico (Tensões Efetivas) e um semiempírico (Décourt-Quaresma) para estacas pré-moldadas de concreto; Mendes; Mendes e Araújo (2022), fazendo uma análise comparativa entre métodos teóricos (NAVFAC DM 7.2, CSN 73 1002 e Tensão Efetiva); Silva et al. (2021)

analisando a acurácia dos métodos NAVFAC DM 7.2 e Aoki-Velloso; dentre outras publicações. No entanto, mesmo com diversos trabalhos desenvolvidos, ainda existem várias incertezas acerca do cálculo da capacidade de carga, especialmente para estacas.

Assim, o presente estudo tem como objetivo comparar a acurácia dos métodos semiempíricos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma em relação a resultados obtidos em campo, com provas de carga em estacas hélices-contínuas instaladas em variados perfis de solo. Os resultados deste estudo podem ser muito úteis no que diz respeito à escolha do tipo de método a ser aplicado, em prática, nos projetos para a estimativa da capacidade de carga de fundações por estacas do tipo hélice-contínua, levando em conta que os métodos aqui abordados são os mais utilizados para o dimensionamento de fundações em estacas no Brasil (DÉCOURT, 1998).

Revisão Bibliográfica

Serão abordados os métodos de previsão da capacidade de carga em estacas, em específico, os métodos semiempíricos de Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma, assim como uma breve contextualização sobre estacas hélices-contínuas.

Capacidade de carga

Segundo Alonso (1991, p. 45), “A capacidade de carga, contra a ruptura, de um elemento de fundação, é aquela que aplicada ao mesmo provoca o colapso ou o escoamento do solo que lhe dá suporte ou do próprio elemento”.

De acordo com Pereira et al. (2020), a expressão geral (1) da capacidade de carga (Q_u) de elementos de fundação por estaca demonstra dois conjuntos de variáveis: i) geométricas da estaca, dadas pelo perímetro (U), o comprimento do segmento (ΔL) e a área da seção transversal da ponta (A_p) e ii) as tensões, que podem ser laterais no fuste (r_L) e tensão de ponta (r_p).

$$Q_u = U \cdot \sum_{i=1}^n (r_L \cdot \Delta L) + r_p \cdot A_p \quad (1)$$

Métodos semiempíricos para a previsão da capacidade de carga em estacas

De acordo com Décourt (1998),

Correlações com boa probabilidade de acerto são aquelas obtidas de forma semiempírica. A filosofia contida nas mesmas é estabelecer-se através de ajustes estatísticos equações de correlação que tenham embutida em sua essência os princípios definidos nos métodos teóricos e/ou experimentais. (DÉCOURT, 1998, p. 273-274).

Como objeto de estudo deste trabalho, temos os métodos semiempíricos para obtenção da capacidade de carga de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978, 1996) que, no Brasil, são os dois métodos mais utilizados para o dimensionamento de fundações em estacas.

Método Aoki e Velloso

Segundo Velloso e Lopes (2010) o método de Aoki-Velloso (1975), que é considerado o primeiro método semiempírico brasileiro, foi desenvolvido a partir de um estudo comparando os resultados de provas de carga de estacas e de sondagem SPT. Tal método pode ser usado tanto com dados do SPT como do ensaio CPT (Cone Penetration Test).

A capacidade de carga (Q_u) pode ser escrita relacionando o atrito lateral e a resistência de ponta, de acordo com a expressão (2):

$$Q_u = \frac{K \cdot N_p \cdot A_p}{F_1} + \frac{U}{F_2} \sum_{i=1}^n K \cdot \alpha \cdot N_L \cdot \Delta_l \quad (2)$$

Onde:

K: coeficiente de conversão que correlaciona o valor de N_{SPT} (obtido das sondagens SPT) com o valor da resistência de ponta do ensaio CPT (tabelado);

α : razão de atrito, ou seja, coeficiente que correlaciona o atrito local do cone com a ponteira e a tensão de ponta da estaca;

N_p : valor de N_{SPT} na ponta da estaca;

A_p : área da seção transversal da ponta da estaca;

N_L : valor médio de N_{SPT} ao longo do fuste da estaca, referente a cada camada de solo;

n: número de camadas ao longo do fuste da estaca;

Δ_L : espessura de cada camada ao longo do fuste da estaca;

F_1 e F_2 : fatores de transformação baseados no tipo de estaca (tabelados). Considera-se F_2 o dobro de F_1 .

Segundo Aoki e Cintra (2010), os fatores de transformação F_1 e F_2 foram obtidos inicialmente por decorrência da publicação do método, em 1975, com base em 63 provas de carga realizadas em vários estados brasileiros. Após a publicação do método, de acordo com Velloso e Lopes (2010), surgiram aprimoramentos para esses fatores.

Por conta do surgimento de publicações que trazem novos valores para K e α , oriundos da comparação do método Aoki-Velloso com provas de carga realizadas em regiões geotécnicas específicas, Aoki e Cintra (2010) reforçam que a tendência no uso do método deve ser manter sua formulação geral, porém substituir as correlações originais por correlações regionais com validade comprovada.

Método de Décourt e Quaresma (1978, 1996)

Décourt e Quaresma desenvolveram um processo para estimar a capacidade de carga com base nos valores de N , do ensaio SPT. Tal método, originalmente desenvolvido para estacas cravadas, foi objeto de uma série de ajustes para adequá-lo a outros tipos de estacas.

Incorporando os valores de coeficientes de correção sugeridos por Décourt (1996), a estimativa da capacidade de carga (Q_u) em estacas, pelo método Décourt-Quaresma (1978) pode ser escrita de acordo com a expressão (3).

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

Onde:

C : coeficiente característico do solo (tabelado);

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

\bar{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);

\bar{N}_l : valor médio do índice de resistência a penetração do SPT ao longo do fuste (independe do tipo de solo). Segundo Aoki e Cintra (2010) são adotados os limites $\bar{N}_l \geq 3$ e $\bar{N}_l \leq 15$ (estendendo o valor para $\bar{N}_l = 50$ para estacas de deslocamento e estacas escavadas com bentonita) e são desconsiderados os valores usados na avaliação da resistência de ponta.

A_p : área da seção transversal de ponta da estaca;

U : perímetro da seção transversal da estaca;

L : seu comprimento total.

Pereira et al. (2020) citam que é importante salientar que o método foi concebido tomando como base a estaca do tipo pré-moldada (estaca referência ou padrão), para a qual os coeficientes α e β são iguais a 1.

Silveira (2002), conforme citado por Pereira et al. (2020), traz sugestões para os valores do coeficiente característico do solo (C) e para os coeficientes empíricos de correção, dados em função do tipo de estaca e do solo (α e β) inicialmente não abrangidos pelo método Décourt-Quaresma (1978, 1996).

Estaca tipo hélice-contínua

Segundo a NBR 6122/2010, estaca hélice-contínua é uma estaca de concreto moldada *in situ*, ou seja, moldada no local da obra, executada mediante a introdução, por rotação, de um trado helicoidal contínuo no terreno e injeção de concreto pela própria haste central do trado simultaneamente com a sua retirada, com posterior colocação da armadura, que é introduzida após a concretagem da estaca (ABNT, 2010).

O uso desse tipo de estaca é razoavelmente recente no Brasil, sendo utilizada pela primeira vez em 1987 e desde então sua aplicação apresentou bastante crescimento (RABELLO, 2008). Ainda segundo Rabello (2008) esse tipo de estaca apresenta, além de grande produtividade, um excelente grau de qualidade.

Metodologia

Este trabalho se enquadra na modalidade de pesquisa quantitativa, com o intuito de contribuir para o avanço nos estudos da engenharia geotécnica, no que diz respeito à capacidade de carga para elementos de fundação por estacas do tipo hélice-contínua. Foram feitas simulações com 40 estacas selecionadas do banco de dados (LOBO, 2005) por meio do software GEO5, as quais passaram por análises estatísticas feitas com o auxílio do software Microsoft Excel®.

Banco de dados

O banco de dados utilizado neste trabalho foi o apresentado por Lobo (2005), composto por 324 provas de carga à compressão e 43 provas de carga à tração, sendo, das provas de carga à compressão, 95 de estacas hélices-contínuas. Os dados são organizados em tabelas, onde as estacas são numeradas e apresentadas suas características como seção transversal e comprimento. Também são apresentados por Lobo (2005) os valores máximos de carga e recalque atingidos pela prova de carga, assim como a carga de ruptura total ($Q_{u, rup}$), lateral ($Q_{l, rup}$) e de ponta ($Q_{p, rup}$) adotadas, bem como os perfis de solo. Para este trabalho, foi selecionado um subgrupo de 40 estacas (hélices-contínuas) do banco de dados. A tabela 1 apresenta o subgrupo de estacas selecionadas. A numeração indicada corresponde à identificação original atribuída por Lobo (2005) (dentro da amostra total) para as estacas do subgrupo aqui utilizado.

Tabela 1 – Estacas selecionadas do banco de dados.

Estaca	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	$Q_{u, rup}$ (kN)	Tipo de solo da ponta da estaca
1	0,35	11,55	1700,00	Argila Silto Arenosa
2	0,35	8,59	880,00	Argila Silto Arenosa
3	0,60	16,04	2700,00	Areia Silto Argilosa
5	0,60	16,00	3600,00	Argila Silto Arenosa
6	0,35	19,00	1350,00	Silte Arenoso
10	0,35	20,20	1720,00	Silte Arenoso
11	0,35	19,60	970,00	Silte Arenoso

13	0,40	16,04	1290,00	Areia Argilo siltosa
15	0,50	17,00	2750,00	Silte Arenoso
19	0,50	12,85	1900,00	Argila Silto Arenosa
20	0,50	12,00	2280,00	Argila Silto Arenosa
22	0,50	21,12	3000,00	Silte Argiloso
23	0,70	17,00	4450,00	Argila siltosa
24	0,70	23,00	4200,00	Silte Arenoso
25	0,35	6,00	990,00	Argila Siltosa
26	0,35	7,00	1430,00	Argila Silto Arenosa
27	0,40	11,40	1230,00	Argila Siltosa
29	0,35	7,50	470,00	Silte Arenoso
30	0,43	7,50	690,00	Silte Arenoso
31	0,40	12,00	1990,00	Silte Arenoso
32	0,40	11,00	890,00	Silte Argiloso
33	0,60	11,46	2120,00	Argila Silto Arenosa
35	0,60	13,50	2700,00	Silte Argiloso
40	0,50	11,00	2140,00	Silte Argilo Arenoso
41	0,50	13,00	2250,00	Silte Areno Argiloso
42	0,50	21,00	2680,00	Silte Areno Argiloso
43	0,60	18,75	2850,00	Areia Siltosa
46	0,50	22,00	2810,00	Silte Arenoso
47	0,40	14,25	1510,00	Silte Argilo Arenoso
49	0,50	18,00	2410,00	Areia Argilosa
56	0,70	18,90	4850,00	Silte Arenoso
60	0,70	15,00	1950,00	Areia Siltosa
62	0,60	16,57	2400,00	Areia Siltosa
63	0,70	23,00	2730,00	Argila Arenosa
64	0,50	12,00	1340,00	Argila Arenosa
66	0,50	18,50	3500,00	Areia Argilosa
70	0,25	14,00	510,00	Silte Areno Argiloso

71	0,25	15,00	700,00	Silte Areno Argiloso
74	0,50	22,00	3200,00	Areia Argilosa
78	0,35	7,00	630,00	Argila Arenosa

Fonte: Adaptado de Lobo (2005).

Software

O programa utilizado é o GEO5 2021, versão demo, criado pela empresa Fine, uma das líderes mundiais no desenvolvimento de softwares de engenharia civil e que, segundo o site da empresa, vem fornecendo programas para a engenharia estrutural e geotécnica desde 1989. Para os procedimentos deste trabalho, foi usado o módulo *estaca via CPT/SPT*, o qual apresenta uma interface limpa e intuitiva.

Foi constatada uma diferença nos resultados quando os coeficientes F_1 , F_2 , K e α , para o método de Aoki-Velloso, são inseridos baseados nos valores recomendados na literatura e quando são calculados pelo próprio GEO5. Da mesma forma aconteceu para o método de Décourt-Quaresma, com os coeficientes C , α e β sendo inseridos a partir da literatura e calculados pelo próprio software. Dessa forma, optou-se por desenvolver o estudo dividindo os dois métodos (Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma) em quatro métodos: Aoki-Velloso (Literatura) e Décourt-Quaresma (Literatura) – com os coeficientes inseridos a partir das tabelas citadas; Aoki-Velloso (GEO5) e Décourt-Quaresma (GEO5), com os coeficientes calculados pelo software (GEO5).

Métodos estatísticos

Coefficiente de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (r), segundo Garson (2009 apud FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009, p. 118), “é uma medida de associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis”. Em outras palavras, estima a associação linear entre essas variáveis. Sua fórmula é definida por:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{Y}}{S_y} \right) \quad (4)$$

Erro percentual

O erro percentual expressa como porcentagem a diferença entre um valor estimado ou medido (neste caso, o valor da capacidade de carga estimado por meio dos métodos semiempíricos) e um valor exato ou conhecido (o valor da capacidade de carga obtida nos ensaios de campo).

$$Erro\% = \left| \frac{(\bar{Q} - Q)}{\bar{Q}} \right| \times 100 \quad (5)$$

Onde:

\bar{Q} : valor de $Q_{u,rup}$ obtido pelo ensaio de campo (valor de referência);

Q : valor de $Q_{u,rup}$ estimado pelo método semiempírico através do GEO5.

Para este estudo foram utilizados tanto os valores absolutos (em módulo) do erro percentual, para obtenção do erro percentual médio, quanto os valores reais para as demais análises e discussões.

Resultados e Discussões

Aoki-Velloso (GEO5)

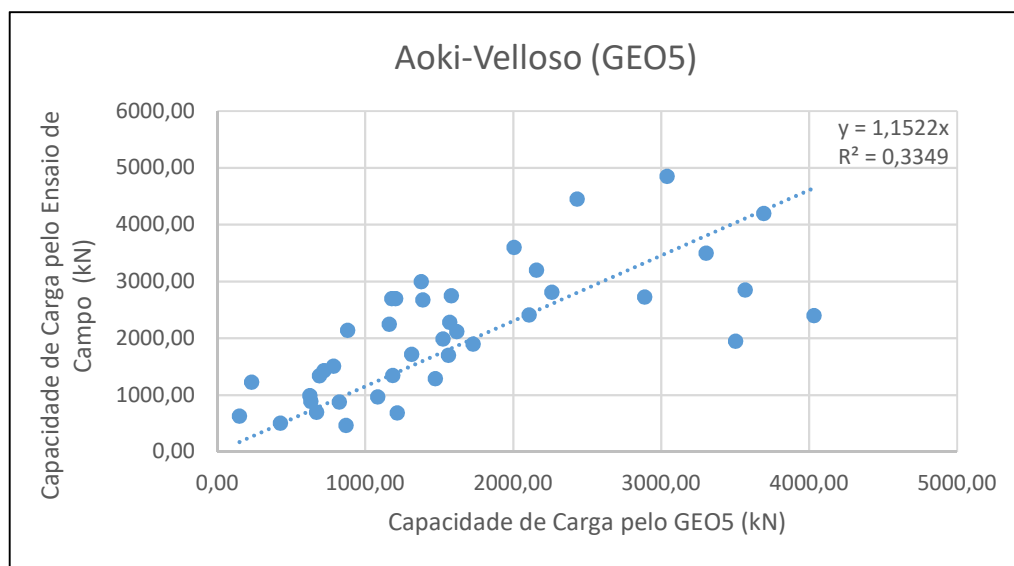
O método de Aoki-Velloso, com os coeficientes calculados pelo GEO5, teve erro percentual médio de aproximadamente 36,67%, sendo o segundo maior valor dentre os métodos propostos. Das 40 estacas que tiveram o valor da capacidade de carga estimado, 5 (aproximadamente 13%) apresentaram valores de erros percentuais na faixa dos 10%, com valores menores do que os de referência, assim sendo, a favor da segurança. De forma distinta, 1/40 (aproximadamente 3%) apresentou erro percentual na faixa dos -10%, com valor de capacidade de carga acima do valor de referência, deste modo, contra a segurança. Já, com o erro percentual na faixa dos 25% e a favor da segurança, o método apresentou 8/40 estacas, aproximadamente 20%, (excluindo as estacas da margem de 10%) e apresentou também 2 estacas com o erro percentual na faixa dos -25%, contra a segurança.

A correlação para este método, seguindo a mesma linha do erro percentual médio, teve o segundo resultado menos satisfatório dentre os métodos, com o valor aproximado de 0,71, o

que, em termos gerais, é um valor que apresenta uma correlação forte com os valores de referência.

O gráfico 1 apresenta a dispersão dos resultados considerando um par coordenado com os valores reais, obtidos em campo e os valores estimados pelas simulações no software.

Gráfico 1 – Gráfico de dispersão para o método de Aoki-Velloso (GEO5).



Fonte: autor, 2022.

Um fator que evidencia, de modo geral, a aproximação dos valores estimados dos de referência é o fato de o coeficiente de ajuste ser superior e próximo a 1, indicando, na sua maioria, resultados conservadores a favor da segurança.

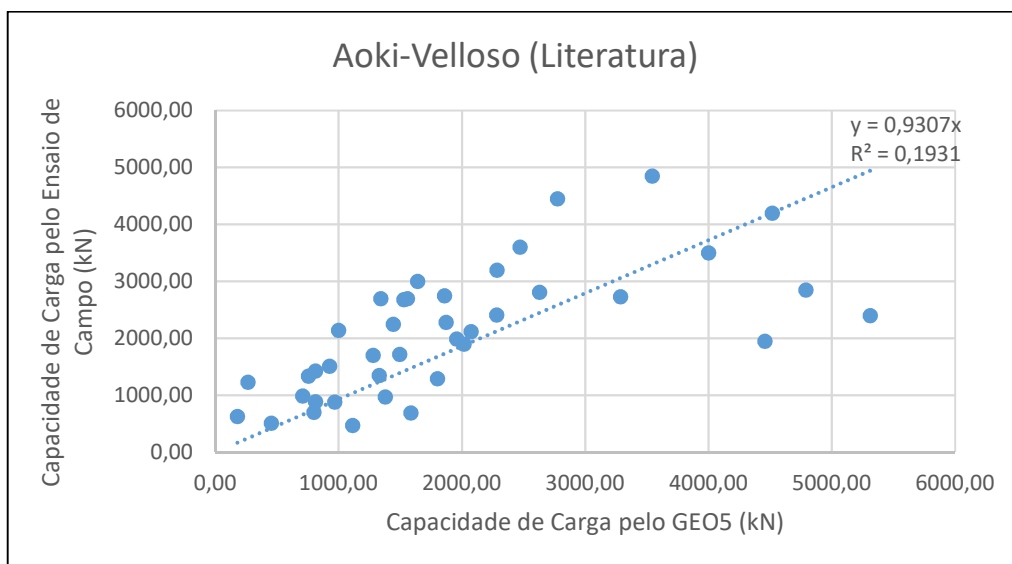
Aoki-Velloso (Literatura)

O método de Aoki-Velloso, com os coeficientes inseridos da literatura, teve o resultado menos satisfatório em relação ao valor do erro percentual médio, de aproximadamente 39,05%. Nesse caso, 6 das 40 estacas (aproximadamente 15%) apresentaram erros percentuais na faixa até 10%, com valores abaixo dos de referência. Também, 3/40 (aproximadamente 7,5%) apresentaram erros percentuais na faixa até -10%, ou seja, com valores de capacidades de carga acima dos respectivos valores de referência e contra a segurança. Com erros percentuais na

faixa de até 25%, o método apresentou 3/40 estacas, aproximadamente 7,5%, e apresentou também 3 estacas com erros percentuais dentro da faixa dos -25%.

Para este método, a correlação de aproximadamente 0,66, assim como o erro percentual médio, evidenciou o menor grau de relação com os valores de referência dentre os métodos estudados, apresentando uma correlação moderada. O gráfico 2 apresenta a dispersão para o método de Aoki-Velloso (Literatura).

Gráfico 2 – Gráfico de dispersão para o método de Aoki-Velloso (Literatura).



Fonte: Autor, 2022.

O fato de o coeficiente ser próximo de 1, porém menor, indica resultados, em certa medida, superdimensionados que se apresentam contra a segurança.

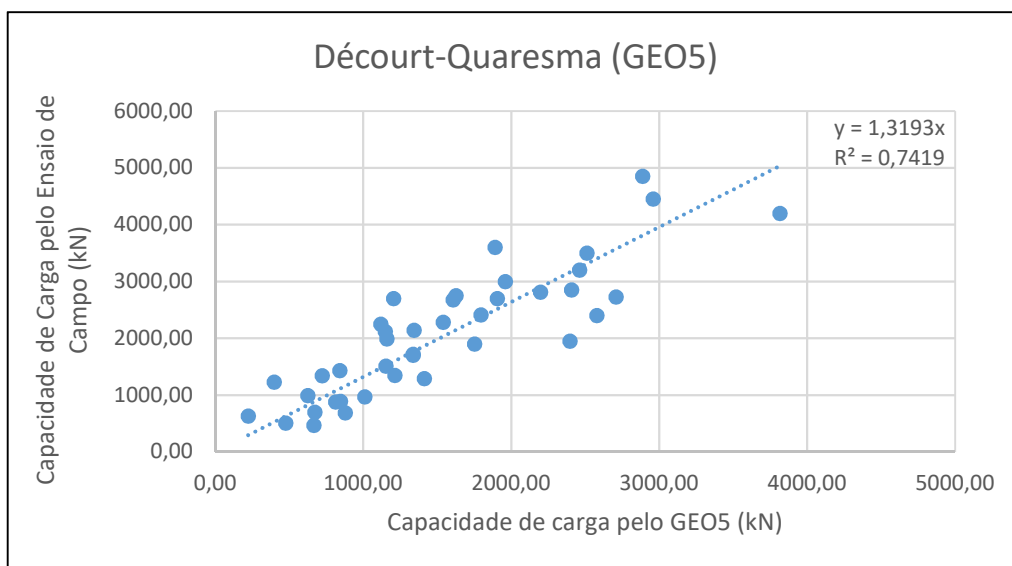
Décourt-Quaresma (GEO5)

Para o método de Décourt-Quaresma, com os coeficientes calculados pelo GEO5 é verificado o segundo melhor resultado no que diz respeito ao erro percentual médio, calculado em aproximadamente 28,27%. Aqui, 8/40 estacas (20%) apresentaram valores de erros percentuais na faixa dos 10%, sendo o método que apresentou mais estacas nessa faixa de erro. Também 3 das 40 estacas (aproximadamente 7,5%) apresentaram erros percentuais dentro da faixa dos -10%, contra a segurança. Já com erros percentuais na faixa dos 25%, a favor da

segurança, o método apresentou 6/40 estacas (15%) e apresentou, também, 1 estaca com o erro percentual na faixa dos -25%.

A correlação para este método foi de 0,8701 e teve o segundo valor mais satisfatório, demonstrando uma relação forte com os dados de referência. O gráfico 3 ilustra tal relação.

Gráfico 3 – Gráfico de dispersão para o método de Décourt-Quaresma (GEO5).



Fonte: Autor, 2022.

No gráfico 3 fica mais perceptível uma menor dispersão dos dados em relação aos métodos anteriores. Com o valor de $a = 1,3193$ é demonstrado um padrão de resultados conservadores.

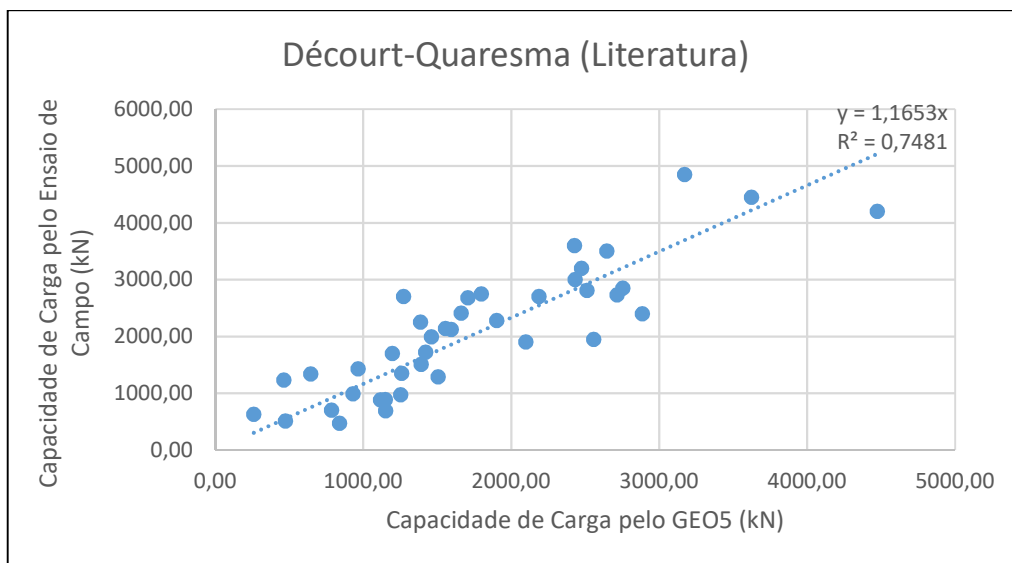
Décourt-Quaresma (Literatura)

O método de Décourt-Quaresma, com os coeficientes inseridos da literatura, foi o que apresentou os melhores resultados se comparado com os métodos anteriores, com um erro percentual médio de aproximadamente 27,04% (o menor dos quatro métodos). Dentre as 40 estacas, 6 (aproximadamente 15%) apresentaram valores de erros percentuais dentro da faixa dos 10%, a favor da segurança. Em contrapartida, 2/40 (aproximadamente 5%) apresentaram erros percentuais na faixa dos -10%. Com erros percentuais na faixa dos 25%, o método

apresentou 10/40 estacas, exatamente 25%, e apresentou também 3 estacas com erros percentuais na faixa dos -25%.

A correlação para este método foi de 0,8713, bem próxima do valor do anterior (do mesmo método, só que com os coeficientes calculados diretamente pelo GEO5) porém maior. O gráfico 4 apresenta a dispersão dos resultados em torno da reta de tendência.

Gráfico 4 – Gráfico de dispersão para o método de Décourt-Quaresma (Literatura).



Fonte: Autor, 2022.

Com o valor de $a = 1,1653$ é demonstrado que o método apresenta um padrão de resultados conservadores, que precisariam aumentar aproximadamente 17% para a obtenção de melhores valores de erros.

Ajustes dos resultados

Os resultados obtidos nas simulações trouxeram dados que podem ser ajustados, a fim de proporcionar melhor aproximação dos valores da capacidade de carga estimados pelos métodos semiempíricos com os valores de referência, dos ensaios de campo. O ajuste é feito por meio do coeficiente a das equações das retas geradas pelos gráficos de dispersão para cada método, que é multiplicado pelos valores das capacidades de carga obtidos nas simulações para cada estaca. Abaixo, na tabela 2, temos as equações de ajuste para cada método estudado.

Tabela 2 - Equações de ajuste para cada método semiempírico.

Equação da reta	Aoki-Velloso (GEO5)	Aoki-Velloso (Literatura)	Décourt-Quaresma (GEO5)	Décourt-Quaresma (Literatura)
	$y = 1,1522x$	$y = 0,9307x$	$y = 1,3193x$	$y = 1,1653x$

Fonte: Autor, 2022.

A partir dessas equações, sendo y o valor da capacidade de carga de referência (ensaios de campo) e x o valor obtido através das simulações (métodos semiempíricos), fazendo o produto de x pelo coeficiente a de cada método, foram gerados novos valores de capacidades de carga para as 40 estacas, as quais passaram pelas análises das métricas estatísticas, com o intuito de avaliar a influência de tais ajustes na qualidade das estimativas. A tabela 3 mostra o valor de cada parâmetro após os ajustes.

Tabela 3 - Correlações e erros percentuais médios para os dados brutos ajustados.

Aoki-Velloso (GEO5)		Aoki-Velloso (Literatura)		Décourt-Quaresma (GEO5)		Décourt-Quaresma (Literatura)	
Correlação	Erro % Médio	Correlação	Erro % Médio	Correlação	Erro % Médio	Correlação	Erro % Médio
0,7072	35,14	0,6631	38,83	0,8701	25,52	0,8713	27,37

Fonte: Autor, 2022.

Com os dados ajustados, pôde-se observar uma diminuição nos valores dos erros percentuais médios para três dos métodos estudados, com exceção do método de Décourt-Quaresma (Literatura), que foi de 27,04% para 27,37%, ou seja, teve um aumento de 0,33%, não sendo mais o método com o valor de erro percentual médio mais satisfatório, caindo para a segunda posição. Neste caso, a quantidade de estacas que ficaram com valores de erros na faixa dos 10%, com valores abaixo dos de referência, continuou sendo 6/40 (15%). Já, para a faixa de -10% o valor subiu de 2/40 para 5/40 estacas (12,5%). Houve mudança também na

quantidade de estacas na margem de 25%, de 9/40 para 10/40 (25%) e na de -25% continuaram as 3/40 (7,5%).

O método que apresentou o resultado mais satisfatório em relação ao erro percentual médio, após os ajustes, foi o método de Décourt-Quaresma (GEO5), com o valor que foi de 28,27% para 25,52%, uma diminuição de 2,75%. Aqui, o número de estacas com valores de erros dentro da margem de 10% foi de 8/40 para 3/40 (7,5%), em contrapartida, a quantidade na faixa até -10% aumentou de 2/40 para 5/40 estacas (12,5%). Houve um grande aumento na quantidade de estacas com valores de erros dentro da faixa dos 25%, abaixo do valor de referência, indo de 6/40 para 10/40 estacas e na faixa dos -25%, também um grande aumento, de 1/40 para 6/40 estacas (15%).

Para o método de Aoki-Velloso (GEO5) o erro percentual médio migrou de 36,67% para 35,14%, com uma diferença de aproximadamente 1,53%. Dentre as 40 estacas estudadas, as que ficaram na margem de até 10% de erro percentual diminuíram de 5 para 2 estacas (5%). Para a faixa de -10% houve um aumento significativo, de apenas 1/40 estaca para 8/40 estacas (20%). Dentro da margem de 25% houve uma diminuição de 8/40 para 6/40 estacas (15%), assim como para a margem de -25%, só que indo de 2/40 para 1/40 estaca.

Ainda depois dos ajustes, o método de Aoki-Velloso (Literatura) continua sendo o método com o valor de erro percentual médio menos satisfatório, mesmo com a queda de 39,05% para 38,83%. Nos valores de erros percentuais para cada estaca, dentro do intervalo de 0 a 10%, houve a diminuição de 6/40 para 4/40 estacas (10%) e no intervalo de 0 a -10% houve o aumento de 3/40 para 4/40 estacas (também 10%). Nas faixas dos 25% e -25% houve uma diminuição de 3/40 para 6/40 (15%) estacas e de 3/40 para 1/40 estaca (2,5%), respectivamente.

Identificação e análise dos *Outliers*

Mesmo após os ajustes aplicados, é observável nos resultados obtidos das métricas estatísticas que existem valores de erros percentuais que se afastam demasiadamente da média e, dessa forma, influenciam na eficiência dos resultados: os *outliers*. Segundo Lima et al. (2018), os *Outliers* são valores que apresentam um valor distinto dos demais dados coletados e acabam sendo valores que não são representativos da população estudada. Em contrapartida, esses valores que se afastam dos demais “podem revelar importantes informações sobre os dados analisados” (TRIOLA, 2012, p. 97 apud LIMA et al., 2018, p. 218). Dessa forma, optou-

se por fazer a análise separadamente dos dados discrepantes para cada método, buscando a justificativa para tal.

Optou-se por utilizar na identificação dos *outliers* o método baseado na amplitude interquartil (IQR), oriunda da AED (Análise Exploratória de Dados) (TURKLEY, 1977). Com auxílio do software Microsoft Excel®, para os dados obtidos nas simulações e análises estatísticas (erros percentuais), foram calculados o primeiro e terceiro quartis, (Q_1) e (Q_3), respectivamente, bem como a amplitude interquartil (IQR) e os limites superiores e inferiores que definirão o intervalo fora do qual um resultado será considerado um *outlier*. Abaixo estão as equações utilizadas (equações 6, 7, 8, 9 e 10).

$$Q_1 = \frac{N + 1}{4} \quad (6)$$

$$Q_3 = \frac{3(N + 1)}{4} \quad (7)$$

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (8)$$

$$L_{inf} = Q_1 - (1,5 \times IQR) \quad (9)$$

$$L_{sup} = Q_3 - (1,5 \times IQR) \quad (10)$$

Onde N representa a quantidade de dados da amostra, L_{inf} é o limite inferior e L_{sup} é o limite superior que definem o intervalo. Ressalta-se que foram utilizados os “dados brutos” para identificação dos *outliers*, ou seja, dados que não passaram por nenhum tipo de ajuste. Após a identificação e exclusão dos dados discrepantes, foram feitas novas análises estatísticas para verificação da melhora dos resultados.

Tanto para o método de Aoki Velloso (GEO5) quanto para o Aoki Velloso (Literatura), dos valores referentes às 40 estacas, foram identificados 4 *Outliers*, nas estacas 29, 30, 60 e 62, sendo que para o primeiro método os valores discrepantes variaram entre -68% e -85% e para

o segundo variaram entre -121% e -137%. Foi observado que as pontas dessas estacas repousam em perfis de solos semelhantes (estacas 29 e 30: Silte Arenoso; estacas 60 e 62: Areia Siltosa). Em relação aos solos que ocorrem ao longo do fuste, contribuindo para resistência lateral, não se identificou um padrão tão claro, encontrando-se argila silto-arenosa e silte arenoso (estacas 29 e 30) e areia argilosa, argila arenosa e areia siltosa (estacas 60 e 62).

Para o método de Décourt-Quaresma, com coeficientes do GEO5, não foram identificados *outliers*. Já para o método com os coeficientes da Literatura foi identificado 1 *outlier*, também na estaca 29. Ressalta-se que, para manter a uniformidade da quantidade de amostras, as estacas que apresentaram *outliers* (29, 30, 60 e 62) foram eliminadas para todos os métodos nos estudos que se seguem.

Análises estatísticas sem os *Outliers*

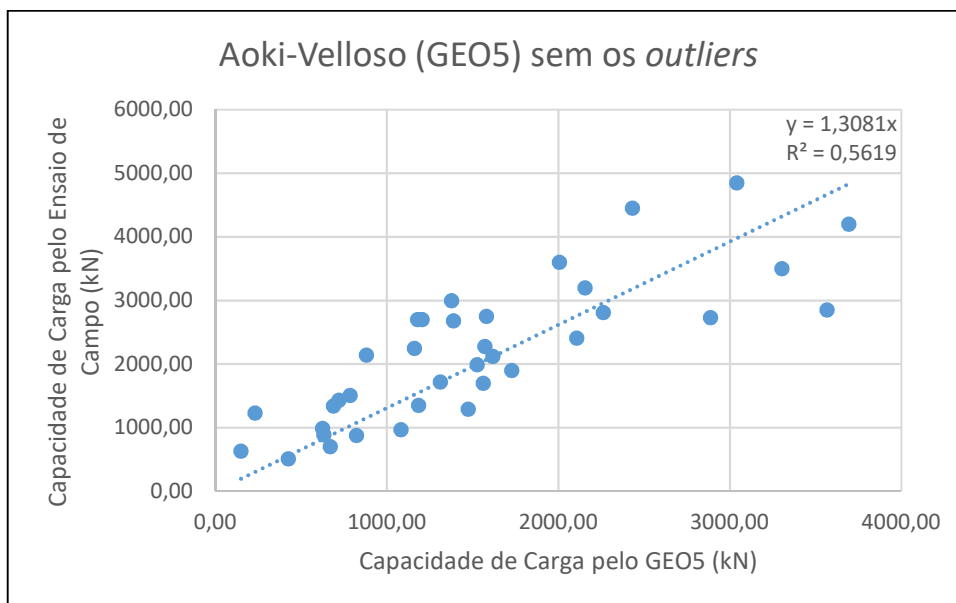
Após a exclusão dos dados das estacas que apresentaram resultados considerados *outliers*, foram aplicadas as análises estatísticas (correlação, erro percentual e erro percentual médio) aos valores de capacidade de carga estimados nas simulações em relação aos valores de referência, dos ensaios de campo, para as 36 estacas remanescentes do subconjunto estudado.

Aoki-Velloso (GEO5) sem os *outliers*

Para o método de Aoki-Velloso com os coeficientes calculados pelo GEO5, após a exclusão dos *outliers*, o valor do erro percentual médio caiu de 36,67% para 32,17%, uma diminuição de aproximadamente 4,5% em relação aos resultados obtidos com os dados brutos, ficando agora como o método com o valor de erro percentual médio menos satisfatório. Aqui, 5 das 36 estacas (13,89%) ficaram com valores de erros percentuais na faixa dos 10%, com resultados abaixo dos valores de referência, a favor da segurança. Também apresentou 1/36 estaca (2,78%) com o valor de erro percentual na faixa dos -10%, com valor de capacidade de carga acima do valor de referência e contra a segurança. Com erros percentuais na faixa dos 25%, o método apresentou 8/36 estacas (22,22%) e 2/36 estacas (5,56%) com erros percentuais na faixa dos -25%. No total, o método apresentou dentre as 36 estacas, 32 com valores abaixo do de referência, a favor da segurança e apenas 4 acima, contra a segurança. A correlação teve uma melhora no seu resultado, indo de 0,7071 para 0,8134 apresentando ainda uma correspondência forte com os valores de referência (dos ensaios de campo). Essas diferenças

demonstram como esses valores discrepantes (*outliers*) podem interferir na qualidade da análise dos dados. Abaixo temos o gráfico 5 de dispersão para este método.

Gráfico 5 – Gráfico de dispersão para o método de Aoki-Velloso (GEO5) sem os *Outliers*.



Fonte: Autor, 2022.

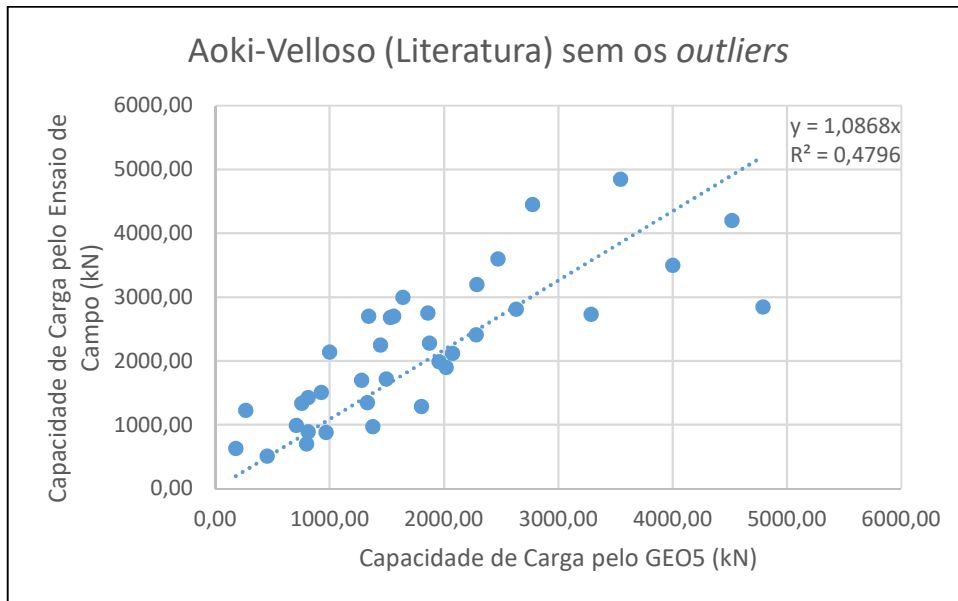
No gráfico de dispersão acima é possível observar que o valor de R^2 (coeficiente de determinação) é mais próximo de 1 do que para o mesmo método sem a exclusão dos *outliers*. Neste caso, o valor do coeficiente angular da equação da reta é de aproximadamente 1,3081, permanecendo um valor que indica resultados conservadores, por ser superior e próximo a 1.

Aoki-Velloso (Literatura) sem os *outliers*

Neste método, o valor do erro percentual médio foi de 39,05% para 29,05%, passando a não ser mais o método com valor de erro menos satisfatório já que obteve valor menor que o do método anterior. Sua correlação também teve uma melhora, indo de 0,6631 para 0,7897, passando de uma correlação moderada para uma correlação forte para com os valores de referência. Para a faixa de 10% nos valores de erros percentuais, se enquadraram 6/36 estacas (16,67%) e para a de -10% foram 3/36 estacas (8,33%). Já dentro da margem de 25% e -25% foram, respectivamente, 4/36 (11,11%) e 3/36 (8,33%). Neste caso, foram 27 estacas com

valores abaixo dos de referência e 9 acima. O gráfico 6 mostra a dispersão dos dados em torno da linha de tendência.

Gráfico 6 – Gráfico de dispersão para o método de Aoki-Velloso (Literatura) sem os *Outliers*.



Fonte: Autor, 2022.

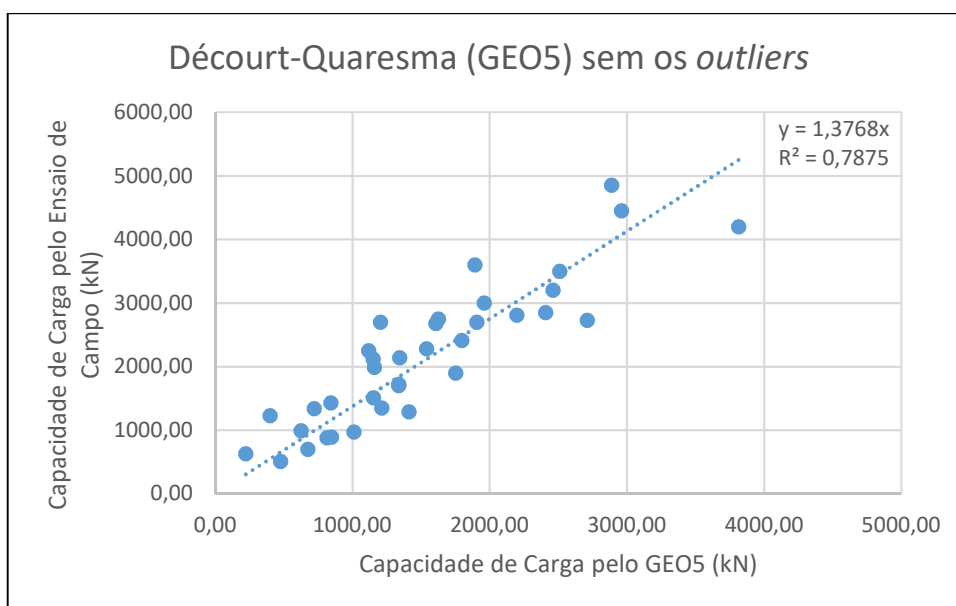
Destaca-se que sua equação apresenta o coeficiente angular (a) igual a 1,0868, valor esse que antes da exclusão dos *outliers* era de 0,9307, ou seja, foi de um valor abaixo de 1 para um valor próximo e acima de 1. Observou-se também um ligeiro aumento no valor de R^2 , passando de 0,8283 para 0,8961.

Décourt-Quaresma (GEO5) sem os outliers

Sendo o segundo método com melhor resultado de erro percentual médio, 28,27%, Décourt-Quaresma, com os coeficientes de correção calculados pelo GEO5, é o único dos métodos no qual não se teve identificação de *outliers*. Porém, como foi citado anteriormente, para os quatro métodos estudados foram eliminadas 4 estacas que apresentaram dados discrepantes em pelo menos um dos métodos, para melhor uniformidade nas análises. Isso certamente foi o motivo pelo qual esse método também teve uma variação positiva no seu erro percentual médio em relação ao subconjunto de dados, sem a exclusão dos *outliers*, de

aproximadamente 0,38%, sendo que seu valor na métrica anterior foi de 28,27%. Das 36 estacas, 8 (22,22%) ficaram dentro da margem de até 10% de erro percentual, bem como 2/36 (5,26%) na faixa de -10% e 6/36 (16,67%) na de 25%. Não houve nenhuma estaca dentro da margem de -25%. Já o valor da sua correlação foi de 0,8701 para 0,8974, permanecendo uma correlação forte com os resultados de referência.

Gráfico 7 – Gráfico de dispersão para o método de Décourt-Quaresma (GEO5) sem os *Outliers*.



Fonte: Autor, 2022.

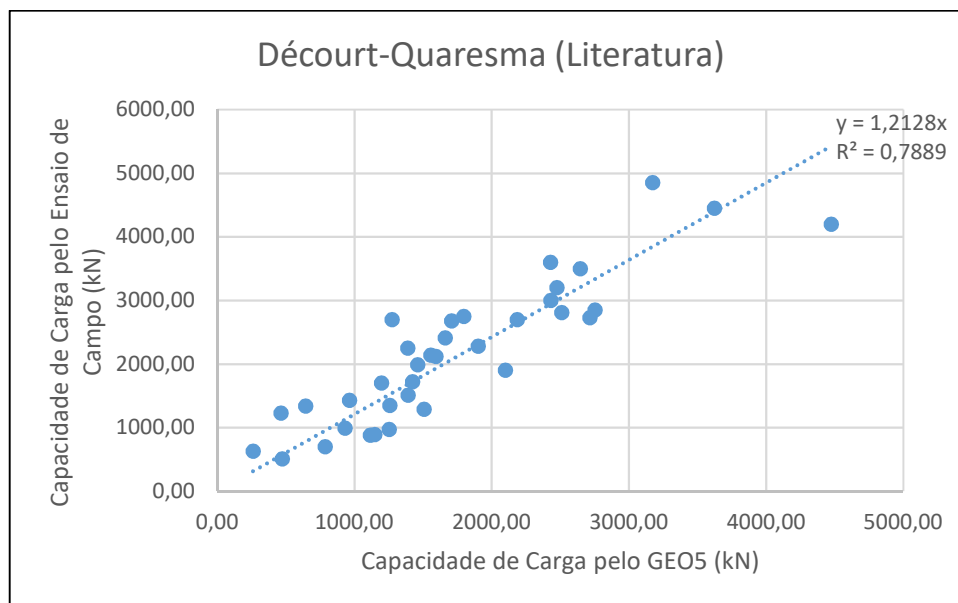
Para este método, das 36 estacas, 34 ficaram com valores de capacidades de carga abaixo dos valores de referência e somente 2 com valores acima, contra a segurança. Pode-se observar na equação da reta do gráfico 7 de dispersão que o valor do coeficiente angular (1,3768) demonstra a tendência para resultados conservadores.

Décourt-Quaresma (Literatura) sem os *outliers*

Com a exclusão dos *outliers*, para o valor do erro percentual médio, o método de Décourt-Quaresma com coeficientes inseridos da literatura é o que obtém resultado mais satisfatório, indo de 27,04% na análise dos dados brutos para 24,59%, em uma diferença de aproximadamente 2,45%. Para os erros percentuais dentro da margem dos 10% ficaram 6/36

estacas (16,67%) e para -10% foram 2/36 estacas (5,56%). Já, na faixa dos 25% e -25% foram 9/36 (25%) e 2/36 (5,56%) estacas. No total, das 36 estacas estudadas, 29 tiveram resultados a favor da segurança, com valores abaixo dos referências e 7 contra a segurança, acima dos valores de referência. A correlação, por sua vez, foi de 0,8713 para 0,8971, sendo praticamente o mesmo valor do método citado anteriormente, com uma diferença de apenas 0,0003, ficando na “fronteira” entre uma correlação forte e uma muito forte com os resultados de referência.

Gráfico 8 – Gráfico de dispersão para o método de Décourt-Quaresma (Literatura) sem os *Outliers*.



Fonte: Autor, 2022.

O valor do coeficiente angular da reta de 1,2128 aponta para resultados, em sua maioria conservadores, continuando a tendência observada na análise do método sem a exclusão dos *outliers*, porém com o valor um pouco mais distante de 1 e com R^2 um pouco mais próximo, tendo aumentado de 0,9464 para 0,9578.

Ajuste dos resultados sem *Outliers*

Assim como foi feito para os resultados com todas as 40 estacas do subgrupo estudado, também se aplicou ao subconjunto das 36 sem os *outliers*. Os coeficientes a obtidos das equações das retas dos gráficos de dispersão, gerados para cada método, foram multiplicados

pelos resultados de suas respectivas simulações com a finalidade da diminuição do erro percentual e melhorias nos resultados. Na tabela 4 estão as equações da reta para cada método.

Tabela 2 – Equações de ajuste para cada método semiempírico sem os *outlier*.

Equação da reta	Aoki-Velloso (GEO5)	Aoki-Velloso (Literatura)	Décourt- Quaresma (GEO5)	Décourt- Quaresma (Literatura)
	$y = 1,3081x$	$y = 1,0868x$	$y = 1,3768x$	$y = 1,2128x$

Fonte: Autor, 2022.

Após os ajustes dos resultados, foram feitas novamente as análises por meio das métricas estatísticas (correlação, erro percentual e erro percentual médio) para cada método a fim de verificar a melhoria na qualidade dos dados.

As análises estatísticas mostraram que, após os ajustes dos resultados, obteve-se uma melhora nos valores de erro percentual médio para os quatro métodos, permanecendo a correlação com o mesmo valor para todos por conta da natureza linear na relação entre as variáveis. Para o método de Aoki-Velloso (GEO5) o erro percentual médio foi de 32,17% para 27,51% após os ajustes, uma diminuição de aproximadamente 4,66%. Das 36 estacas, 21 ficaram com valores abaixo dos de referência, sendo 4/36 (11,11%) até 10% de erro percentual e 4/36 dentro da margem dos 25%, a favor da segurança. Já acima dos valores obtidos em campo e contra a segurança foram 15 estacas no total, sendo 3/36 (8,33%) dentro da margem dos -10% e 7/36 (19,44%) na faixa dos -25%. A correlação entre os resultados dos métodos estudados e os de referência permaneceu forte, com o valor de 0,8134.

O método de Aoki-Velloso (Literatura) foi o que obteve o valor de erro percentual médio menos satisfatório após o ajuste dos resultados, indo de 29,05% para 28,60%. Aqui, 22/36 estacas apresentaram capacidade de carga abaixo dos valores de referência e 14/36 acima. A favor da segurança, dentro das faixas de até 10% e até 25% de erro percentual foram 3/36 (8,33%) e 5/36 (13,89%) estacas, respectivamente. Já contra a segurança, na faixa até -10% e até -25% também foram 5/36 estacas (13,89%) cada. O valor da correlação permaneceu 0,7897, uma associação forte com os resultados de campo.

Sendo o método que apresentou os melhores resultados após os ajustes, Décourt-Quaresma (GEO5) foi de 28,66% para 21,75% no valor do erro percentual médio, uma diferença notável de aproximadamente 6,91%. No total, o método apresentou 19 estacas com resultados inferiores aos dos ensaios de campo e 17 com valores superiores. Em relação ao erro percentual por estaca, dentro da margem de 10% foram 5/36 estacas (13,88%), de 25% foram 7/36 (19,44%) estacas e para -10% e -25% foram 6/36 (16,67%) e 2/36 (5,56%) estacas, respectivamente. A correlação para o método também foi a que obteve o valor mais próximo de 1 dentre os quatro, permanecendo no valor de 0,8974 e apresentando uma forte ligação com os resultados de campo.

Décourt-Quaresma (Literatura) foi o segundo método que apresentou o resultado mais favorável de erro percentual médio após os ajustes, indo de 24,59% para 22,30%. Para o erro percentual por estaca, a favor da segurança e nas margens de até 10% e até 25% ficaram 6/36 (16,67%) e 3/36 estacas (8,33%), respectivamente. Para resultados contra a segurança e na faixa de -10% e -25% as quantidades de estacas foram 3/36 (8,33%) e 6/36 (16,67%), respectivamente. Ao todo, 20 tiveram resultados favoráveis à segurança e 16 desfavoráveis, seguindo a linha dos métodos anteriores, que tiveram uma diminuição significativa na quantidade de resultados a favor da segurança após os ajustes, o que se deve ao fato de o coeficiente refletir a possível correção na aproximação dos resultados, independentemente de serem maiores ou menores do que os de referência.

Conclusão

Tendo em vista os resultados obtidos para os dois métodos aqui estudados (subdivididos em quatro) e fazendo as devidas comparações e observações, pode-se afirmar que ambos apresentam resultados relativamente satisfatórios, obtendo, no pior dos cenários, erros médios abaixo dos 39,1%, correlação com os resultados de referência moderada em um dos casos e forte em sua maioria. Porém, o método de Décourt-Quaresma foi o que demonstrou mais acurácia em seus resultados, haja vista que, tanto para as análises feitas com os dados brutos quanto para os dados com a exclusão das estacas *outliers* e ajustes, manteve-se sempre com a maior correlação e menor valor de erro percentual médio, atingindo os melhores resultados na variação do método em que os coeficientes C , α e β foram calculados direto pelo GEO5: correlação de 0,8974 e erro percentual médio de 21,75%. Cabe destacar que, enquanto o método

de Aoki-Velloso apresentou 4 resultados considerados *outliers* em cada uma das suas duas variações (GEO5 e Literatura), o método de Décourt-Quaresma apresentou apenas 1 na versão com coeficientes inseridos da Literatura, e nenhum no Décourt-Quaresma (GEO5). Observou-se também que as 4 estacas que apresentaram outliers têm suas pontas repousando em solos do tipo Silte Arenoso e Areia Siltosa, configurando, portanto, uma relação de menor confiabilidade (em especial no uso do método de Aoki-Velloso) quanto a sua presença.

É importante frisar que para estudos aplicados a esta pesquisa, dentro dessa área da engenharia geotécnica relacionada à determinação da capacidade de carga para fundações, existem inúmeros fatores que podem ter influenciado nos resultados. Dentre eles, Cabette (2014) cita as condições de carregamento, diferenças nos processos executivos, erros de sondagens e, principalmente, as características e variabilidade do solo e as incertezas acerca de seus parâmetros, o que pode reverberar em dados muitas vezes discrepantes, como foi o caso dos *outliers* identificados, tendo em comum entre si as pontas das estacas repousando sobre solo Siltoso Arenoso e Arenoso Siltoso.

Desse modo, levando-se em consideração a variabilidade dos resultados em decorrência da variação dos requisitos citados anteriormente, sugere-se que estudos posteriores sejam conduzidos com uma quantidade maior de estacas, com perfis de solo que não estiveram presentes nesta pesquisa e com a aplicação de outros métodos não estudados neste trabalho, a fim de determinar, com mais precisão, a influência também de tais aspectos nos resultados da capacidade de carga.

Referências

ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle de qualidade em fundações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

ALONSO, U. R. **Dimensionamento de fundações profundas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

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

CONCEIÇÃO JUNIOR, G. F.; SILVA, P. V. G. Comparativo de capacidade de carga de estacas escavadas por método racional e semiempírico. **Technology Science**, v. 2, n. 1, p. 18-22, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2674-6425.2020.001.0003>. Acesso em: 02 abr. 2023.

DÉCOURT, L. Estacas. In: HACHICH, W. et al (Orgs.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 6. ed. São Paulo: Editora Thomson, 2006.

FIGUEIREDO FILHO, D. B. F.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, 2009.

GARSON, G. D. **Statnotes: Topics in Multivariate Analysis**. North Carolina State University, 2009. Disponível em: <http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>. Acesso em 02 abr. 2023.

GEO5. Fine Civil Engineering software. **Guia do Usuário: Programa Estaca via CPT/SPT**. Fine Ltd, 2018.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.

LIMA, L. S. F. M. et al. A influência de outliers nos estudos métricos da informação: uma análise de dados univariados. **Em Questão**, Porto Alegre, v. 24, p. 216–235, 2018. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/EmQuestao/article/view/86661>. Acesso em: 05 abr. 2023. DOI: 10.19132/1808-5245240.216-235

LOBO, B. O. **Método de previsão de capacidade de carga em estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT**. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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/rsd-v11i15.37758>. Acesso em: 10 set. 2022.

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.

PEREIRA, A. B. et al. 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**, v. 6, n. 2, p. 5948–5976, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/6689>. Acesso em: 03 set. 2023. DOI: 10.34117/bjdv6n2-049.

PINTO, C. S. Propriedade dos solos. In: HACHICH, W. et al (Orgs.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

RABELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

SCIPIÃO, C. C.; MOURA, A. S. Proposta de previsão de capacidade de carga à tração de estacas tipo hélice contínua em solos granulares. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, n. 48, p. 146-155, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/62485>. Acesso em: 09 set. 2023.

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.

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