

# Uso de Ferramental Estatístico na Melhoria de Métodos de Capacidade de Carga Geotécnica na Cidade de Recife

Gérson Jacques Miranda dos Anjos  
Professor, UFPA, Belém - PA, Brasil, mirandadosanjos@gmail.com

Pedro Daniel Uchôa Dantas  
Mestre em engenharia civil, UFPE, Recife - PE, Brasil, uchoadaniel50@gmail.com

Roberto Quental Coutinho  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife - PE, Brasil, roberto.coutinho@ufpe.br

Marcelo Seabra de Andrade  
Graduado em engenharia civil, UFPA, Belém - PA, Brasil, eng.marceloseabra@gmail.com

**RESUMO:** As estacas do tipo hélice contínua monitorada, amplamente utilizadas no Brasil, oferecem versatilidade em termos de diâmetro, comprimento e competitividade em comparação com outros tipos de estacas, graças à sua velocidade de execução. Os métodos de capacidade de suporte geotécnica encontrados na literatura são aplicados praticamente em todo o território nacional. O estudo de Dantas (2018), realizado em na cidade de Recife, envolveu 45 provas de carga em estacas hélice contínua. Os métodos avaliados incluem Aoki & Velloso, Laprovitera & Benegas, Monteiro, Decourt & Quaresma, Antunes & Cabral e o método de Alonso. Este artigo utiliza 20 ferramentas estatísticas para ranquear esses métodos e determinar qual metodologia oferece melhor previsão em relação à razão entre valores calculados e medidos da carga total obtida em provas de carga lenta. Além disso, o ferramental estatístico utilizado permite otimizar cada método, minimizando o erro na relação entre valores calculados e medidos. O estudo conclui com a escolha do melhor método e a identificação da ferramenta estatística de maior desempenho entre todas as apresentadas para análise. Os resultados dos métodos foram agrupados e calculados em relação às sondagens mais próximas e ao grupo de sondagens para cada metodologia mencionada anteriormente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estaca hélice contínua, Métodos de desempenho estatístico, capacidade de carga total

**ABSTRACT:** Continuous Flight Auger piles, widely used in Brazil, offer versatility in terms of diameter, length, and competitiveness compared to other types of piles, thanks to their execution speed. Geotechnical bearing capacity methods found in the literature are consistently applied across national territories. The study by Dantas (2018), conducted in Recife, involved 45 load tests on continuous flight auger piles. The evaluated methods include Aoki & Velloso, Laprovitera & Benegas, Monteiro, Decourt & Quaresma, Antunes & Cabral, and the Alonso method. This article employs 20 statistical tools to rank these methods and determine which methodology provides the best prediction concerning the ratio between calculated and measured values of total load obtained in slow load tests. Furthermore, the statistical tools used allow for optimizing each method by minimizing the error in the relationship between calculated and measured values. The study concludes by selecting the best method and identifying the statistical tool with the highest performance among all those presented for analysis. The method results were grouped and calculated in relation to the nearest boreholes and the borehole group for each previously mentioned methodology.

**KEYWORDS:** Continuous Flight Auger pile, Statistical performance methods, total load capacity

## 1 INTRODUÇÃO

As estacas do tipo hélice contínua monitorada (HCM) são, provavelmente, uma das mais usadas em quase todo o vasto território nacional, empregadas desde obras de porte médio, com diâmetros da ordem de 30

cm, até obras de maior porte, em que estacas com diâmetro de 1 m são frequentemente utilizadas. Equipamentos cada vez mais robustos contribuem significativamente para a “nova” realidade de projetos cada vez mais arrojados, transformando a execução de obras com esse tipo de equipamento. Inegavelmente, as fundações do tipo escavadas refletem uma tendência mundial.

A Geotecnia é um ramo da ciência que estuda a marcante diferenciação entre geomateriais e não será menos impactante na Geotecnia de Fundações. Karl Terzaghi certa vez disse “[...] *infelizmente, solos são feitos pela natureza e não pelo homem, e os produtos da natureza são sempre complexos*”. E continua: “*Os solos naturais nunca são uniformes e sendo assim, suas propriedades variam de ponto a ponto e o conhecimento de suas propriedades, em geral, são realizadas através de limitadas amostragens numa porção ínfima do domínio que, em geral, são envolvidos nos problemas da mecânica dos solos*”. Sob “pena” das palavras de Terzaghi, estão todas as vertentes da Geotecnia. Em geral, as maiores incertezas estão nos resultados do limitado conhecimento das condições do solo (Anjos, 2006). Diante da complexidade inerente, o emprego de ferramental apoiado em técnicas estatísticas se mostra pertinente. Quando utilizadas de maneira adequada, essas ferramentas podem ser aliadas na busca por respostas mais precisas. Quando se busca saber, por exemplo, qual metodologia tem maior expressividade estatística pra um local específico? Ou ainda, é possível ajustar as metodologias de forma que passem a prever mais adequadamente a capacidade de carga geotécnica? O artigo pretende demonstrar que é possível responder às duas perguntas mencionadas anteriormente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estaca Hélice Contínua

No Brasil, as estacas hélice contínua foram introduzidas por volta de 1987. Porém, a primeira publicação técnica sobre estas estacas só ocorreu em 1989, no Rio de Janeiro, durante a realização do XII ICSMFE, com a publicação “*ABEF Research on Foundation Engineering*”. Esta publicação relata as primeiras pesquisas sobre este tipo de estaca em nosso país, feitas no Campus da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Segundo Antunes & Tarozzo (1996), nesta época, o processo executivo destas estacas ainda não era totalmente instrumentado, necessitando de guindastes adaptados com torre acoplada e dotados de mesa giratória com torque de 35 kN.m para a execução de estacas com diâmetros de 275 mm, 350 mm e 425 mm. Estes equipamentos só permitiam a execução destas estacas até 15 m de profundidade. Só a partir de 1993, houve um grande progresso e desenvolvimento do uso destas estacas. Considerando 1993 como o início de seu uso, já são mais de trinta anos de uso deste tipo de estaca no Brasil.

Atualmente, a NBR 6122/2019 no item 3.17 define a estaca hélice contínua monitorada como: “*estaca de concreto moldada in loco, executada mediante a introdução no terreno, por rotação, de um trado helicoidal contínuo no terreno e injeção de concreto pela própria haste central do trado, simultaneamente à sua retirada, sendo a armadura introduzida após a concretagem da estaca*”.

### 2.1 Ferramental Estatístico

O ferramental estatístico utilizado neste trabalho consiste em vinte ferramentas distintas, as quais são empregadas para classificar os métodos, buscando um ranqueamento entre eles. Além disso, essas mesmas ferramentas são utilizadas para buscar um coeficiente que possa aprimorar o desempenho dos métodos em termos dos valores calculados e medidos. Tal escolha deu-se em virtude de que não há uma ferramenta definitiva na avaliação do ajuste entre valores calculados (previstos) e medidos de grandezas quaisquer.

Sendo assim, optou-se pela avaliação na forma de *ranking*, utilizando as seguintes ferramentas estatísticas: Índice de Referência (IR); Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (E); Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE); Índice de Performance; Índice de Legate & McCabe (LMI); Erro Absoluto Médio (MAE); Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WMAPE); Incerteza Expandida (U95); Índice de Mielke Modificado; Índice de Concordância de Willmott (d); Probabilidade LogNormal (P\_In) - tipicamente com acurácia de 20%; Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE); Coeficiente de Determinação (r<sup>2</sup>); Probabilidade Normal (P) - tipicamente com acurácia de 20%; Ranking Index (RI); Raiz do Erro Percentual Quadrático Médio (RMSPE), Ranking Distance (RD); Variância Explicada (VAF); Erro Percentual Absoluto Mediano

(MedAPE); e Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático (RMSEs). As análises estatísticas tipicamente usam índices estatísticos tais como média, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ ), histogramas, etc. A definição de cada um dos métodos estatísticos é de fácil obtenção e, por limitação de espaço, serão somente citados.

É digno de nota que nem todos estes índices são eficazes para fins de análise de relação de valores (medidos/previsto) de uma determinada grandeza geotécnica, por exemplo. A série de ferramentas estatísticas apresentadas são utilizadas como medidas de desempenho dos modelos de previsão de diferentes métodos na avaliação da capacidade de carga de estacas hélice contínua. A soma (acumulada) das classificações é empregada na classificação geral para determinar os melhores métodos. Os modelos que acumularem menor somatória são aqueles que apresentam melhores classificações entre todos os testes estatísticos e, logo, apresentam melhor ajuste de dados. Este *ranking* estimula a análise de inúmeras ferramentas estatísticas ao invés de uma ou duas, como tipicamente ocorre na literatura e que, em muitos casos, podem chegar a conclusões bastante diferentes em responder, por exemplo, qual método tem melhor acurácia.

Os mesmos índices e coeficientes estatísticos apresentados para a classificação, com exceção do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), são aplicados para calcular os coeficientes de melhoria ( $\alpha$ ) nas equações preditivas. O coeficiente  $\alpha$  representa o fator pelo qual o resultado da formulação original deve ser multiplicado, atuando para aprimorar a acurácia de um método. O coeficiente  $\alpha$  é calculado utilizando a ferramenta SOLVER do Excel para encontrar o “ponto ótimo” das ferramentas estatísticas, com base nos dados da relação entre os valores medidos e previstos dos respectivos modelos. Por exemplo, no caso do *Ranking Distance*, busca-se encontrar um valor de  $\alpha$  que minimize o valor de RD, resultando em melhores resultados. Portanto, o SOLVER é aplicado em cada formulação dentro do conjunto de dados, objetivando encontrar coeficientes  $\alpha$  que ajustem uma determinada ferramenta, minimizando ou maximizando o seu valor original.

## 2.2 Estacas em subsolo da Região Metropolitana de Recife.

De acordo com Dantas (2018 *apud* Gusmão Filho, 1998) os eventos geológicos do Recife se desenvolveram sequencialmente: falhamento do embasamento cristalino, criando uma superfície rebaixada a leste; deposição dos sedimentos provenientes da bacia cretácea; erosão e deposição da Formação Barreiras no litoral; e Formação da planície do Recife. Esta última etapa é relativa ao período Quaternário e é caracterizada pela sedimentação dos solos arenosos, argilosos e siltosos, ocasionada pelos cíclicos avanços e recuos do mar e oriunda das deposições aluviais, fluviais e flúvio-lagunares. Portanto, se encontram na Planície do Recife áreas compostas por mangues, terraços marinhos, terraços fluviais e aluviões, cujas localizações foram mapeadas por Alheiros et al. (1995). Pela proximidade com o oceano e por estarem rodeados por canais, mangues, rios ou lagos, há uma certa similaridade nas áreas delimitadas pelos bairros de Barra de Jangada, Candeias e Reserva do Paiva, com o bairro de Boa Viagem. Esta situação orienta o entendimento de que estes locais sofreram sedimentação pelo mesmo processo, descrito anteriormente, de progressão e regressão do mar. O trabalho de Dantas (2018) dará suporte às análises feitas neste artigo quando o mesmo apresenta o resultado de 45 provas de carga com o uso de estacas hélice contínua (HCM) na região metropolitana de Recife.

Ainda, Dantas (2018) é assertivo em que “apesar do uso da estaca HCM ser uma prática recorrente da região e das condições geológicas/geotécnicas serem mais entendidas, o estudo apresenta indicações de quais os melhores métodos de cálculo (capacidade de carga total) a serem empregados na Região Metropolitana de Recife (RMR) e se há necessidade de modificações ou ajustes nas formulações originais fornecendo informações prévias mais confiáveis que constitui uma das principais decisões nos projetos de fundações.”.

Dantas (2018) analisou 45 provas de carga, sendo 14 com estacas de 400 mm, 19 com 500 mm e 12 para estacas de 600 mm. Os bairros incluídos no estudo são: Cabo de Santo Agostinho, Reserva do Paiva, Barra de Jangada, Candeias, Piedade, Boa Viagem, Pina, Centro do Recife, Torre, Graças, Poço da Panela, Casa Forte, Parnamirim, Tamarineira, Rosarinho, Encruzilhada, Boa Vista e Igarassu. As análises conduzidas por Dantas (2018) consideraram duas situações distintas: uma envolvendo apenas a sondagem mais próxima (SP); e outra levando em conta a influência de um grupo de sondagens (GS) ao redor da estaca. Neste último caso, foram incluídas outras sondagens no procedimento, visando determinar a média dos resultados e obter uma previsão da capacidade de carga representativa do grupo de sondagens.

### 3 Apresentação dos dados e resultados dos métodos

Na Figura 1, são apresentadas informações de subsolo das obras localizadas em Boa Viagem, Boa Vista, Casa Amarela, Espinheiro, Imbiribeira, Monteiro, Piedade, Poço da Panela, Tamarineira e Torre, coletando 28 perfis de sondagens, que apresentam em 85% a predominância de solos arenosos. O método de Van Der Veen foi empregado para representar as provas de carga extrapoladas neste estudo, e os valores medidos são referentes a esse método específico. Algumas modificações foram adotadas por Dantas (2018), quer sejam:

- $N_{SPT}$  máximo de 40 golpes, salve os métodos que possuem restrição inferior a esta;
- Camadas com presença de pedregulhos ou fragmentos de conchas, geralmente arenosas - areia pura;
- Os valores de  $F_1$  e  $F_2$  do método de Aoki & Velloso (1975) foram admitidos como 3 e 6, respectivamente;
- Os valores de  $F_1$  e  $F_2$  para as propostas de Laprovitera (1988) e Benegas (1993) foram admitidos de acordo com Velloso e Lopes (2010), respectivamente 2 e 4;
- Para o método de Antunes & Cabral (1996) foram considerados os valores  $\beta'_1$  e  $\beta'_2$  expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes do Método de Antunes & Cabral (1996)

Tipo de Solo	$\beta'_1$ (%)	$\beta'_2$
Areia	5,0	2,5
Areia argilosa	4,0	2,0
Areia siltosa	4,5	2,3
Silte	3,0	1,5
Silte arenoso	3,5	2,0
Silte argiloso	2,5	1,0
Argila	2,0	1,0
Argila siltosa	2,8	1,3
Argila arenosa	3,5	1,5

$$Q_r = U \sum \beta'_1 N \Delta L + \beta'_2 N_b A_b \quad (1)$$

onde  $\beta'_1$ . está relacionado ao fuste e  $\beta'_2$  está relacionado à base;  $q_b$  (resistência unitária da base)  $\leq 4$  MPa

Obra	Estaca	Bairro	Sondagem	Percentual de solo arenoso (%)	Percentual de solo siltoso(%)	Percentual de solo argiloso (%)	camada de ponta	Média do NSPT	NSPT de Ponta
1.1.	E1	Monteiro	SP-01	59%	27%	14%	Silte argiloso	14	$\geq 40$
			SV-02	100%	0%	0%	Areia siltosa	11	16
1.2.	E2	Boa Viagem	SP-004	47%	24%	29%	Areia	15	$\geq 40$
1.3.	E3 E4	Poço da Panela	SP-04	74%	0%	26%	Areia	13	29
			SP-02	89%	0%	11%	Areia argilosa	18	14
1.4.	E5	Boa Viagem	SP-03	68%	26%	6%	Areia	8	17
2.1.	E6 E7	Boa Viagem	SP-05	58%	0%	42%	Areia c/ pedregulho	15	34
			SP-04	68%	0%	32%	Areia c/ pedregulho	15	28
2.2.	E8 E9	Tamarineira	SP-02E	89%	11%	0%	Areia siltosa	15	$\geq 40$
			SP-004	35%	50%	15%	Silte argiloso	18	$\geq 40$
2.3.	E10	Casa Amarela	SP-02	22%	78%	0%	Silte arenoso	21	$\geq 40$
2.4.	E11	Piedade	SP-002	64%	18%	18%	Silte argiloso	15	9
2.5.	E12	Boa Viagem	SP-01	80%	20%	0%	Areia argilosa	15	34
2.6.	E13	Tamarineira	SP-03	37%	63%	0%	Areia siltosa	27	$\geq 40$
2.7.	E14 E15	Tamarineira	SP-001	38%	56%	6%	Silte argiloso	17	$\geq 40$
			SP-005	81%	19%	0%	Silte argiloso	20	$\geq 40$
2.8.	E16	Boa Vista	SP-03	66%	34%	0%	Silte arenoso	13	15
2.9.	E17 E18	Imbiribeira	SP-02	74%	26%	0%	Silte arenoso	9	17
			SP-04	96%	0%	4%	Areia siltosa	10	11
3.1.	E19	Espinheiro	SP-02	100%	0%	0%	Areia siltosa	11	$\geq 40$
3.2.	E20 E21	Torre	SP-05	91%	9%	0%	Areia argilosa	17	$\geq 40$
			SP-03	70%	17%	13%	Areia argilosa	15	$\geq 40$
3.3.	E22	Casa Amarela	SP-02	100%	0%	0%	Areia	19	$\geq 40$
3.4.	E23 E24 E25 E26 E27	Tamarineira	SP-10	63%	37%	0%	Silte arenoso	15	$\geq 40$
			SP-16	67%	33%	0%	Silte arenoso	14	38
			SP-05E	100%	0%	0%	Areia silto-argilosa	13	$\geq 40$
			SP-09	70%	20%	10%	Silte arenoso	13	$\geq 40$
			SP-09E	75%	0%	25%	Areia silto-argilosa	13	31

Figura 1. Informações de algumas sondagens representativas do trabalho – Predomínio de solo arenoso

Na Tabela 2, são apresentados os resultados dos valores medidos e calculados das diversas metodologias associadas tanto à sondagem mais próxima (SP) quanto ao grupo de sondagens próximo à estaca ensaiada (GS). Os valores medidos e calculados estão expressos em kN. São mostradas um total de 12 metodologias, sendo 6 correspondentes à sondagem mais próxima (SP) e 6 ao grupo de sondagens (GS).

Tabela 2. Valores medidos e calculados - capacidade de carga geotécnica na Região Metropolitana de Recife

Medido	A&V_GS (kN)	A&VSP (kN)	L&B_GS (kN)	L&B_SP (kN)	MRO_GS (kN)	MRO_SP (kN)	D&Q_GS (kN)	D&Q_SP (kN)	A&C_GS (kN)	A&C_SP (kN)	ALO_GS (kN)	ALO_SP (kN)
1890	1644	1074,2	1770	1329,8	2185,7	1852,6	1831,5	1701,9	2217,3	2006,2	2243,2	2012,7
1320	1578,2	1944,9	1603,7	1463,6	1289,7	1254,5	1129,2	981,4	1138,7	1058,7	1406,9	1222,7
1870	1364,2	1009,4	1727,6	1299,1	1965	1482,3	1684,6	1313,7	1953,8	1753	2259,9	1755,7
1760	1223,5	1371,8	1888,8	1919,7	2109	2332,7	1891	2059,6	2095,4	2432,8	2564,8	2790,6
1780	1760,5	2006,2	1999,1	2111,9	1938,9	2179,2	1581,1	1769,4	1735,7	1798,2	1988,9	2225,5
1800	1556,1	2006,2	1977,7	2111,9	1910,7	2179,2	1534,1	1769,4	1625,9	1798,2	1954,1	2225,5
1130	1884,7	1902	1725,3	1659	1695,2	1577,7	1325,4	1249,2	1456,4	1411,8	1555,6	1469,4
1160	1884,7	1842,6	1725,3	1669,8	1695,2	1640	1325,4	1254,3	1456,4	1413,4	1555,6	1468,6
1800	2376,4	2339,1	2311,4	2255,9	2270,3	2281,8	1808,7	1742,2	1877,2	1863,6	2234,9	2197,4
1680	2376,4	2261,3	2311,4	2239	2270,3	2122,3	1808,7	1710,4	1877,2	1683,3	2234,9	2158,1
2040	2376,4	2462,6	2311,4	2326,7	2270,3	2405,5	1807,7	1846,6	1877,2	2011,9	2234,9	2342,8
1680	2376,4	2310,1	2311,4	2179,2	2270,3	2193,2	1808,7	1685	1877,2	1808,3	2234,9	2103,2
1236,4	1055,5	892,7	978,7	930,1	1545,1	1622,7	1473,3	1575,1	1834,5	1876,5	1623	1722,4
1336,4	1055	1575,8	978,7	1259,2	1545,1	1680,3	1473,3	1529,5	1834,5	2099,2	1623	1730,8
1680	2690,2	2721,9	2843,1	2834	2950,9	2847,4	2332,5	2273,5	2505,8	2357	2884,4	2780,1
1760	2690,2	2380,2	2843,1	2553,6	2950,9	2715	2332,5	2177,9	2505,8	2426,9	2884,4	2701
3030	3919,3	3977,7	3813,9	3920,9	4044,2	4124,4	2965,2	3047,9	3199,2	3250,8	3914,6	4007,6
3040	2472,4	2280	2331,7	2251,2	2778,9	2888,4	2309,1	2275,4	2691	2729,3	2967,9	3000,8
3560	2647,7	1851,5	3148,1	2549,4	3006,1	2599,8	2748,7	2503	2584,6	2981	3189,2	3159,5
2870	3126,1	3241,7	3073,7	3217	3451,7	3492,9	2661	2627,9	2965,7	2805,4	3404,9	3430,8
3110	3234,9	3970,9	3934,9	4156,1	4492,2	4937,4	3802,8	4019,1	3179,8	3335,2	4534,9	4633,8
1520	2919,8	3261,9	2791,2	3081,4	2521,2	2648,4	1925,1	1959,1	2024	1962,7	2529,2	2509,2
1530	1431,4	1012,4	2266,8	2096,4	1829,3	1540,9	1513,4	1340,9	1795,2	1496,2	2018,1	1814,8
2900	3137	3110,8	3930,2	4010,9	3510,9	3506,2	2840,4	2855,2	2841,8	2814,1	3550,3	3562,9
2650	2085,1	2640,5	2596	2958,4	2470,8	2899,9	2213,5	2379	2043,9	2210,1	2621,7	3136
2420	3499,8	3222,8	2975,1	2883,4	3307,8	3420,9	2505,7	2522,4	3017,3	3061,5	3146,8	3211,3
2860	4211,1	3485	4080,9	3093,6	5453,6	4463,5	5235,4	4011,6	4800,9	4611,1	4574,7	4310,1
2901,2	3506,8	3547,9	3335,1	3453,5	3591,4	3628,6	2837,5	2900,4	3229,8	3238,2	3515,7	3543,4
2070	3349,4	3554,9	3056,3	3309	2951,9	3302,3	2339,4	2433,8	2630,3	2645,2	2845,7	3113,2
2160	3349,4	3767,2	3056,3	3535,9	2951,9	3685,8	2339,4	2683,3	2630,3	2936,6	2845,7	3442,5
1909,8	3979,2	3945,8	3561,2	3635,5	3805	3806,6	2914,9	2926,8	2984,3	3167,5	3606,2	3681,2
3008	3113	2683,7	3239,1	3098,4	3457,3	3167,3	2828,7	2711	3185,4	3012,8	3402,3	3216,3
2372	4683,3	4578,9	4205,2	4101,3	5346,1	4990,8	4130,4	3961,6	5211,1	4987,3	5263,2	4929,9
3780	3394,3	3875,5	4746,9	4975,3	4200,6	4051,2	3586,2	3674,2	3797,2	3645,5	4331	4304,6
5010	4244,8	5393,7	4194,7	4868	5106,3	5541,7	3586,4	3910,1	4310,4	4579,5	4679,2	5115,8
3550	2549,9	3455,9	3467,8	4674,9	3046,2	3964,3	2538,8	3110,2	2872,1	3501,3	3284,1	4055,5
3480	2966,7	3327,7	4188,5	4383,3	3618,6	3505,6	3104,3	2925	3476,5	3358	4082,4	3745,9
3390	2358,2	3158,9	3043,5	3190	2918,2	3026,7	2578	2498,8	3023,6	2725,6	3325,8	2921,1
2970	4066,9	3827,7	4018,2	3775,9	4018,9	3813,3	3200,7	3056,6	3461,9	3396,7	4085,5	3881,8
4750	3361,8	2355,4	4487,3	3848,6	4822,2	4120,7	4391,7	3972,6	3544,2	3923,1	5415,4	5263,1
4110	3351,7	2722,3	4483	4194,4	4679,7	4831,2	4237,6	4900,1	3668,5	3691,7	5098,6	5891,6
4080	5036,6	4939,8	3823,8	3482,1	2976,6	2677,3	3182,8	2937,5	2642,2	2426,9	3187,2	3005,1
3610	5227,8	5414,6	4791,8	4845,1	5205,3	5578,8	3778,8	3877,1	4489,3	4655,8	4833,1	5105,7
2500	2058,7	1210,8	2641,2	1989,6	2339	1816,7	1882,5	1617,3	2241,3	1860,5	2508,4	2248,4
4044	4095,8	4103,7	3783,1	3715,6	4866,1	4698,6	3694,5	3658,7	4696,4	4843,1	4844,3	4749,5

#### 4 Análise de Resultados

A metodologia empregada na validação do método mais eficaz envolve o uso de um código-fonte desenvolvido em VBA (Visual Basic for Applications) no ambiente do Excel. Inicialmente, são calculados os resultados para as vinte ferramentas estatísticas apresentadas. Em seguida, é determinado um coeficiente  $\alpha$  que otimiza o desempenho de cada ferramenta estatística. Vale destacar que, devido à própria natureza da ferramenta, o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) não pode ser otimizado. Portanto, apenas dezoito das vinte ferramentas possíveis serão ajustadas com um coeficiente específico, conforme necessário.

Na Figura 2a, os resultados das análises indicam claramente que o método de Décourt & Quaresma obteve o melhor desempenho estatístico entre as vinte ferramentas avaliadas, tanto para a sondagem mais próxima (SP) quanto para o grupo de sondagens próximo à estaca ensaiada (GS), ocupando respectivamente o primeiro e o segundo lugar no ranqueamento. Por outro lado, o método de Aoki & Velloso mostrou-se com o pior desempenho estatístico, tanto para GS quanto para SP. Na Figura 2b, o ranqueamento considerando o coeficiente  $\alpha$  resultou em uma mudança significativa nos resultados. Agora, o método de Alonso (1996) para GS ( $\alpha = 0,808$ ) e SP ( $\alpha = 0,802$ ) apresentou um desempenho superior ao método de D&Q para SP ( $\alpha = 1,006$ ) e GS ( $\alpha = 0,994$ ), ocupando o terceiro e o quarto lugar, respectivamente. Esse resultado destaca a influência da escolha do coeficiente na avaliação do desempenho das metodologias. Ele ilustra claramente que a seleção de uma determinada ferramenta pode levar a conclusões diferentes sobre qual método apresenta a melhor performance. A Figura 3a mostra todas as vinte e quatro variações (6 métodos, usando 2 sondagens e 2

coeficientes  $\alpha$  diferentes). Na Figura 3b têm-se a lista com as 20 ferramentas estatísticas utilizadas. De forma geral, o índice de referência, definido como  $IR = (RMSE+MAE+MAPE)/3$ , obteve melhor desempenho.

**CLASSIFICAÇÃO GERAL**

Apenas métodos originais

Ordem	Método	Alfa	Soma
1	D&Q_SP (kN)	1,0	678
2	D&Q_GS (kN)	1,0	892
3	A&C_SP (kN)	1,0	2254
4	A&C_GS (kN)	1,0	2554
5	L&B_GS (kN)	1,0	2576
6	ALO_GS (kN)	1,0	2821
7	L&B_SP (kN)	1,0	2890
8	ALO_SP (kN)	1,0	2962
9	MRO_GS (kN)	1,0	3152
10	MRO_SP (kN)	1,0	3240
11	A&V_GS (kN)	1,0	3265
12	A&VSP (kN)	1,0	3427

(a)

**CLASSIFICAÇÃO GERAL**

Apenas melhores alfas

Ordem	Método	Alfa	Soma
1	ALO_GS (kN)	0,808	185
2	ALO_SP (kN)	0,802	199
3	D&Q_SP (kN)	1,006	667
4	D&Q_GS (kN)	0,994	880
5	L&B_GS (kN)	0,838	1009
6	MRO_GS (kN)	0,821	1527
7	A&C_SP (kN)	0,916	1637
8	L&B_SP (kN)	0,839	1725
9	MRO_SP (kN)	0,808	1949
10	A&C_GS (kN)	0,904	1989
11	A&V_GS (kN)	0,872	2970
12	A&VSP (kN)	0,828	3127

(b)

Figura 2. Ranqueamento entre os métodos – a) sem melhoria ( $\alpha = 1,0$ ); b) com melhoria ( $\alpha \neq 1,0$ )

Ordem	Método	Alfa	Soma
1	ALO_GS (kN)	0,808	185
2	ALO_SP (kN)	0,802	199
3	D&Q_SP (kN)	1,006	667
4	D&Q_GS (kN)	0,994	880
5	D&Q_GS (kN)	1,0	892
6	L&B_GS (kN)	0,838	1009
7	MRO_GS (kN)	0,821	1527
8	A&C_SP (kN)	0,916	1637
9	L&B_SP (kN)	0,839	1725
10	MRO_SP (kN)	0,808	1949
11	A&C_GS (kN)	0,904	1989
12	A&C_SP (kN)	1,0	2254
13	A&C_GS (kN)	1,0	2554
14	L&B_GS (kN)	1,0	2576
15	ALO_GS (kN)	1,0	2821
16	L&B_SP (kN)	1,0	2890
17	ALO_SP (kN)	1,0	2962
18	A&V_GS (kN)	0,872	2970
19	A&VSP (kN)	0,828	3127
20	MRO_GS (kN)	1,0	3152
21	MRO_SP (kN)	1,0	3240
22	A&V_GS (kN)	1,0	3265
23	A&VSP (kN)	1,0	3427
24	A&VSP (kN)	1,0	3427

(a)

Ordem	Critério	Ranking
1	Índice de Referência (IR)	972
2	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (E)	1522
3	Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	1524
4	Índice de Performance	1544
5	Índice de Legate & McCabe (LMI)	1790
6	Erro Absoluto Médio (MAE)	1794
7	Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WMAPE)	1795
8	Incerteza Expandida (U95)	1866
9	Índice de Mielke Modificado	1937
10	Índice de Concordância de Willmott (d)	2103
11	Probabilidade LogNormal (P_In)	2504
12	Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE)	3001
13	Coefficiente de Determinação ( $r^2$ )	3015
14	Probabilidade Normal (P)	3401
15	Ranking Index (RI)	3564
16	Raiz do Erro Percentual Quadrático Médio (RMSPE)	3566
17	Ranking Distance (RD)	3588
18	Variância Explicada (VAF)	3685
19	Erro Percentual Absoluto Mediano (MedAPE)	4210
20	Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático (RMSEs)	4990

(b)

Figura 3. a) Ranking final dos métodos; b) ferramentas estatísticas utilizadas na análise

Na Figura 3, observa-se que a maioria dos métodos se beneficiou da melhoria com valores de  $\alpha$ , com exceção do método de Aoki & Velloso (A&V), para o qual quase nenhum benefício foi incorporado sob as condições de cálculo admitidas. Por outro lado, o método de Décourt & Quaresma (D&Q), com ou sem melhoria, permanece como o método de maior desempenho. Além disso, o método de Alonso (ALO) melhorado é inequivocamente identificado como o de melhor desempenho para os dados analisados e as condições de cálculo consideradas no estudo.

As Figuras 4a e 4b mostram os resultados plotados dos valores calculados e medidos para os métodos de melhor e pior desempenho sem melhoria, respectivamente. Já as Figuras 5a e 5b exibem o método de melhor desempenho com melhoria e o método de pior desempenho com melhoria, respectivamente.

As análises realizadas neste artigo partem do pressuposto de que o método de extrapolação utilizado (Van Der Veen, 1953) representa a carga total ou carga limite da estaca. No entanto, mudar esse critério, adotando um valor fixo de deslocamento (por exemplo, 5 a 10% do diâmetro nominal da estaca) poderia resultar em uma resposta final diferente, alterando a interpretação dos resultados apresentados na Figura 3.

Da mesma forma, modificar o método de extrapolação, como utilizar o método de Chin ou Décourt, que se baseiam em equações hiperbólicas e tendem a produzir valores maiores que o método de Van Der Veen, o qual utiliza uma equação exponencial e produz valores menores na extrapolação, poderia impactar significativamente a resposta final. A escolha do método de extrapolação pode influenciar a interpretação dos resultados e a confiabilidade das conclusões obtidas nas análises estatísticas realizadas.

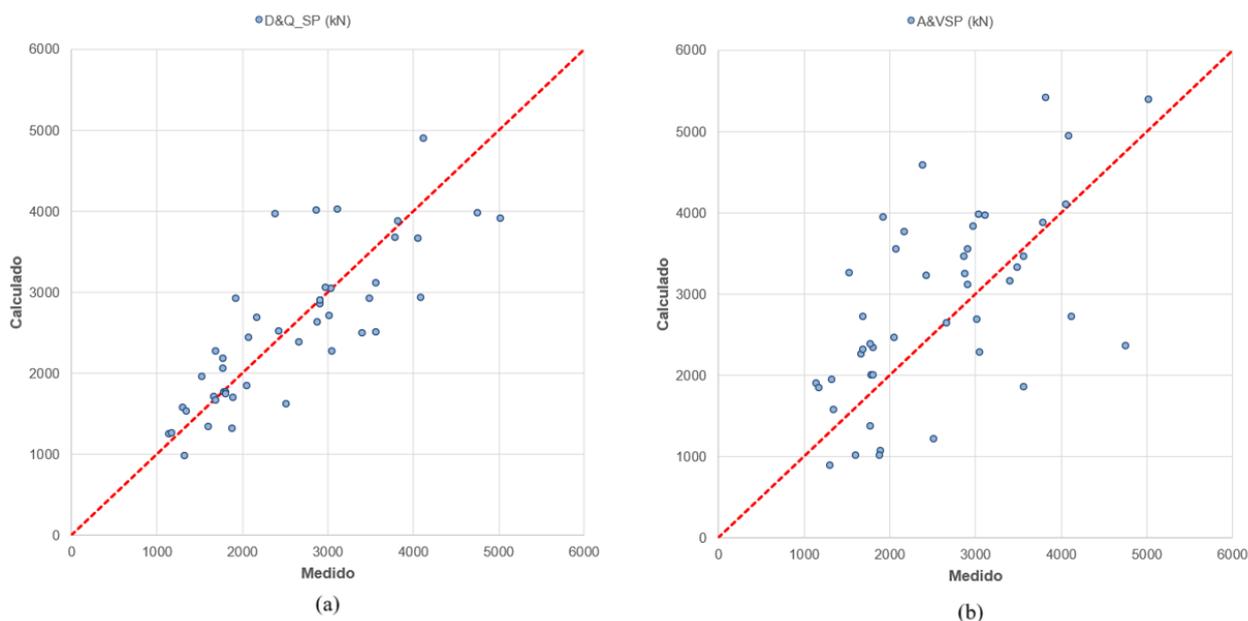


Figura 4. Método com melhor e pior desempenho (valores calculados e medidos **sem melhoria**)

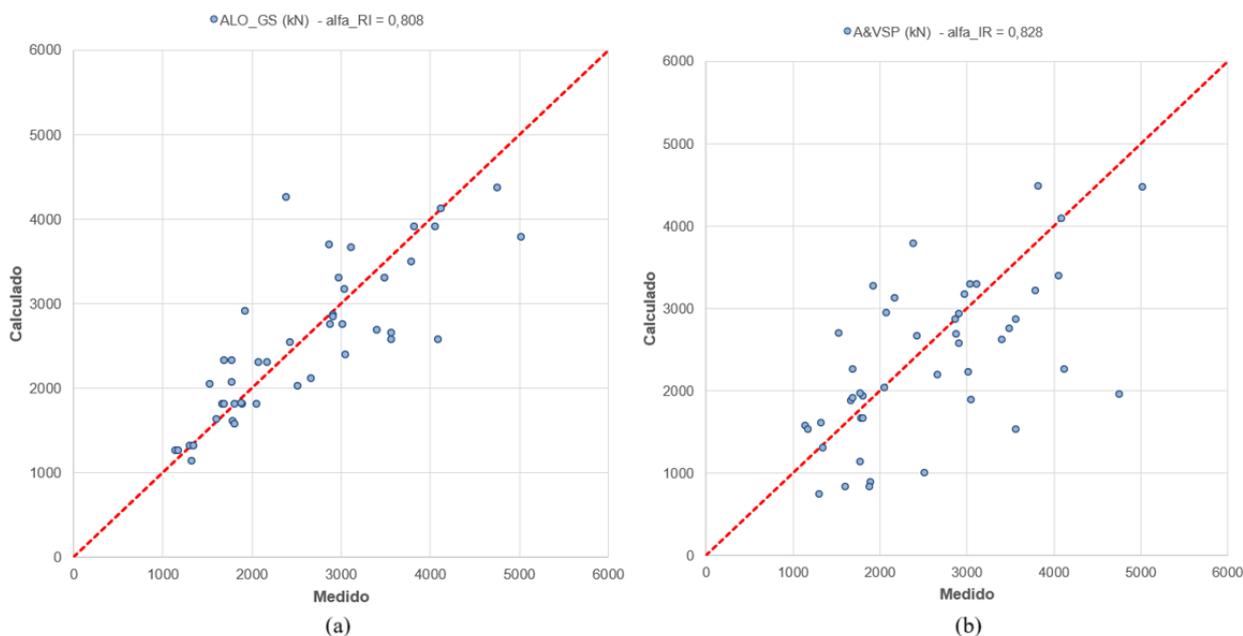


Figura 5. Método com melhor e pior desempenho (valores calculados e medidos **com melhoria**)

## 5 CONCLUSÃO

O artigo apresentou análises utilizando diversas ferramentas de natureza estatística, permitindo a escolha do método de melhor desempenho para as condições de análise por meio de um ranqueamento entre esses métodos, para o subsolo da cidade de Recife/PE. Além disso, o estudo propõe a melhoria de cada um dos métodos por meio do uso de ferramentas estatísticas. Essa melhoria é realizada por meio do uso de um coeficiente ( $\alpha$ ) encontrado para cada uma das ferramentas estatísticas.

Os resultados das 45 provas de carga analisadas mostram que, sem nenhuma melhoria, o método de Décourt & Quaresma (D&Q) para SP, seguido por D&Q para GS, apresenta um amplo ganho de desempenho em relação aos demais métodos. O ranqueamento segue com os demais métodos: A&C\_SP, A&C\_GS, L&B\_GS, ALO\_GS, L&B\_SP, ALO\_SP, MRO\_GS, MRO\_SP, A&V\_GS, A&VSP. Após o uso do processo de melhoria (usando  $\alpha$ ), para a maioria dos métodos (exceto A&V), houve um ganho de desempenho na análise, mostrando um novo cenário em que o método de Alonso (1996) GS ( $\alpha = 0,808$ ) e SP ( $\alpha = 0,802$ ) mostraram-se superiores aos demais com resultados finais, conforme mostrado na Figura 3.

O estudo ressalta que conclusões distintas podem ser obtidas dependendo do uso de diferentes ferramentas estatísticas, e, portanto, o uso de mais ferramentas (e adequadas ao problema) constitui um pequeno, porém importante, passo na melhoria das análises em diversas áreas da Geotecnia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEF (1989) *Research on Foundation Engineering*. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Alheiros, M.M., Ferreira, M.G.V.X., Lima Filho, M.F. (1995) *Mapa geológico de Recife. Escala 1:25.000 com sinopse geológica*. Convenio Carta Geotécnica da Cidade do Recife. Finep-fndct/lsi-ufpe. 1995.
- Alonso, U.R. (1996) *Estacas hélice contínua com monitoração eletrônica: previsão da capacidade de carga através do ensaio SPTT*. 3º SEFE. São Paulo, 2: 141 -151
- Anjos, G.J.M. (2006) *Estudo do Comportamento de Fundações Escavadas em Solos Tropicais*. Tese de Doutorado. Publicação G.TD/033/06, UnB, DF, 341p.
- Antunes, W.R., Cabral, D.A. (1996) *Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua*, III SEFE, 2: 105-110.
- Antunes, W. R., Tarozzo, H. (1996) Estacas tipo hélice contínua. *Fundações: teoria e prática*, 2, 345-348.
- Aoki, N., Velloso, D.A. (1975) *An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles*. V PACSMFE, Buenos Aires.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019) NBR 6122. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro
- Benegas, H.Q. (1993) *Previsões para a curva carga-recalque de estacas a partir do SPT*, Tese MSc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.
- Dantas, P.D.U. (2018) *Análise de provas de carga estática em estacas do tipo Hélice Contínua executadas na Região Metropolitana do Recife*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Décourt, L., Quaresma Filho, A.R. (1978) *Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT*. VI COBRAMSEG, vol. 1, p. 45-53.
- Gusmão Filho, J. A. (1998) *Fundações: do conhecimento geológico à prática da engenharia*. Recife: UFPE.
- Laprovitera, H., (1988) *Reavaliação de método semi-empírico de previsão da capacidade de carga de estacas a partir de Banco de dados*, MSc, COPPE-RJ.
- Monteiro, P.F., (1997) *Capacidade de carga de estacas – Método Aoki-Velloso*, Relat. Estacas Franki Ltda.
- Van Der Veen, C. (1953) *The Bearing Capacity of a Pile*. 3rd ICSMFE, Zurich, 2: 84-90.
- Velloso, D.A., Lopes, F.D.R. (2010) *Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2.