*XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
*XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*
*24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF*
**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/96**

# Região Metropolitana de Belém e a Capacidade de Carga de Fundação do Tipo Hélice Contínua

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

Marcelo Seabra de Andrade
Graduado em Engenharia Civil, UFPA, Belém, Brasil, eng.marceloseabra@gmail.com

Fernando Navarro Crespo Neto
FN Engenharia, Belém, Brasil, fncresponeto@gmail.com

Ricardo Mendonça de Moraes
D.Sc. em Geotecnia - UnB, Belém, Brasil, ricardo_m_moraes@hotmail.com

RESUMO: A Região Metropolitana de Belém (RMB), assim como outras regiões brasileiras, apresenta ampla utilização de estacas do tipo hélice contínua em projetos de fundações. Este artigo avaliará a resistência lateral unitária ($q_l$) e a resistência unitária de base ($q_b$) com base na análise de 50 provas de carga, correlacionando esses parâmetros ao índice de resistência à penetração ($N_{spt}$), tanto no fuste quanto na base, para estimativa da capacidade de carga total. A metodologia emprega ferramentas estatísticas para a formulação de cada parcela de resistência. A estratigrafia analisada indicou a predominância de frações arenosas (47%), argilosas (31%) e siltosas (23%) nos furos de sondagem. Os resultados demonstram que a metodologia proposta apresenta melhor desempenho estatístico quando comparada aos métodos de Aoki & Velloso (1975), Décourt & Quaresma (1978; 1996), Alonso (1996; 2000), Antunes & Cabral (1996), Monteiro (1997), Gotlieb et al. (2000) e Anjos & Andrade (2020). Entre estes, o método de Anjos & Andrade (2020) apresenta melhor precisão quando aplicado um coeficiente de correção de 0,785 à capacidade de carga total. Verifica-se ainda que os métodos tradicionais tendem a superestimar a capacidade de carga em relação aos resultados de provas de carga, podendo conduzir a avaliações inseguras quando utilizadas.

PALAVRAS-CHAVE: RMB, Estaca Hélice Contínua, Capacidade de Carga Total, Ferramentas Estatísticas

ABSTRACT: The Metropolitan Region of Belém, as well as other Brazilian regions, shows widespread use of Continuous Flight Auger (CFA) piles in foundation engineering. This study evaluates the unit shaft resistance ($q_l$) and unit base resistance ($q_b$) based on the analysis of 50 pile load tests, correlating these parameters with the Standard Penetration Test index ($N_{spt}$) at both shaft and base levels to estimate the total load-bearing capacity. The proposed methodology employs statistical tools to develop predictive formulations for each resistance component. The subsurface profile indicates a predominance of sandy soils (47%), followed by clayey (31%) and silty (23%) materials. The results show that the proposed methodology presents superior statistical performance compared to traditional approaches, including Aoki & Velloso (1975), Décourt & Quaresma (1978; 1996), Alonso (1996; 2000), Antunes & Cabral (1996), Monteiro (1997), Gotlieb et al. (2000), and Anjos & Andrade (2020). Among these, the method by Anjos & Andrade (2020) demonstrates improved accuracy when a correction factor of 0.785 is applied to the total load capacity, while conventional methods tend to overestimate load-bearing capacity, potentially leading to unsafe designs.

KEYWORDS: RMB, Continuous Flight Auger (CFA) piles, Bearing Capacity, Statistical Tools

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a introdução dos primeiros equipamentos de estacas do tipo hélice contínua no país, pode-se sugerir o ano 2000 como sendo o "início real" desse tipo de equipamento em grande parte do território nacional.

Hoje, é inegável que esse tipo de estaca domina os projetos de fundações, sobretudo em grandes centros urbanos. Na Região Metropolitana de Belém (RMB) não é diferente, com ampla adoção em obras de médio e grande porte. Os equipamentos disponíveis na região abrangem desde perfuratrizes de menor porte (torque) até unidades de grande porte, compondo o conjunto padrão de maquinário utilizado pelas construtoras e empresas de fundações locais. Observa-se a significativa redução do uso de estacas cravadas de concreto, anteriormente predominantes, enquanto as estacas metálicas e do tipo trilho, vibradas ou não, atualmente representam uma parcela minoritária nos projetos da RMB. Adicionalmente, soluções como estacas raiz e estacas escavadas – especialmente as de grande diâmetro – ainda são empregadas, porém com utilização moderada.

Sob o aspecto da geomorfologia, a RMB se insere em planícies flúvio-marinhas da bacia sedimentar amazônica, com relevo plano a suavemente ondulado (altitudes < 10 m, tipicamente). O clima equatorial úmido (pluviosidade anual > 2.500 mm) impulsionam processos intempéricos intensos, gerando solos saturados e espessos. O nível d'água pode ser desde raso a profundo e a rede hidrográfica densa (rios, igarapés, influência de marés) condiciona a dinâmica hidrológica superficial e subterrânea. Depósitos quaternários recentes com argilas moles (por vezes são siltes argilosos, orgânico ou não) e ainda com a possibilidade da presença de areia fina (5 a 10%) na matriz de finos predominante. De acordo com Costa (2001), a geologia regional é dividida em três perfis litológicos: sedimentos recentes, sedimentos Barreiras/Pós Barreiras e formação de Pirabas. Por possuir um perfil litológico sedimentar, há o domínio de solos argilosos e siltosos na região.

## 2 METODOLOGIAS DE CAPACIDADE DE CARGA

Desde 1975, com a introdução do método de Aoki & Velloso (Rio de Janeiro), observa-se a popularização dos métodos semiempíricos para a estimativa da capacidade de carga de estacas. Tais abordagens, inicialmente desenvolvidas para estacas cravadas de concreto e metálicas, baseiam-se na correlação com os resultados do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*). Rapidamente, São Paulo entrou em cena e os brilhantes Décourt & Quaresma lançaram, em 1978, o método de capacidade de carga para estaca do tipo cravada, premiado internacionalmente. Inicialmente, os autores apresentaram uma versão do método com o título *"Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT"*, baseado em resultados de 41 provas de carga. O estudo foi conduzido principalmente para estacas pré-moldadas de concreto. Entretanto, os autores admitiam, como primeira aproximação, a aplicabilidade do método também para estacas do tipo Franki. Em 1982, a Revista Construção mostra a versão com a formulação atual para $q_l = 10.N_{spt}/3 + 10$ (kPa) e os valores de $N_{spt}$ para a validade do método, bem como as informações para a determinação da parcela de base (ponta) e da capacidade de carga admissível da estaca. Rapidamente, o método "ganhou o mundo" com o prêmio no *Second European Symposium on Penetration Testing,* que ocorreu em maio de 1982, em Amsterdam. O método passou por uma profunda disseminação no meio técnico, com o uso para estacas escavadas em geral, escavada com bentonita, hélice contínua, raiz e injetada sob alta pressão (Décourt & Quaresma, 1996).

Os autores destacam que o método de Décourt & Quaresma é o mais frequentemente citado para o cálculo da capacidade de carga de estacas hélice contínua, sendo a única modificação consistir na redução da carga de base para 30% do valor obtido para estacas pré-moldadas. A parcela lateral permanece idêntica à do método original aplicado a estacas pré-moldadas, embora o rodapé das tabelas contenha a seguinte observação: "valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis", referente às recomendações dos coeficientes "α" (base) e "β" (fuste) na Tabela 1. Diversos métodos têm sido propostos para a validação da capacidade de carga do sistema estaca-solo em estacas hélice contínua, incluindo contribuições de Aoki & Velloso (1975), Décourt & Quaresma (1978; 1996), Antunes & Cabral (1996), Alonso (SP) (1996), Monteiro (1997), Alonso (ES) (2000), Gotlieb et al. (2000), Karez & Rocha (2000), Vorcaro & Velloso (2000), Francisco (2004), Sales (2004) e o método de Anjos & Sousa (2012), este último submetido ao Cobramseg daquele ano, com metodologia baseada em 100 provas de carga, entre outros métodos.

O método de Anjos & Andrade (2018; 2020) representa a versão mais refinada e abrangente, incorporando 140 provas de carga distribuídas em todo o Brasil e utilizando ferramentas estatísticas que calibraram o método de forma mais precisa, em termos da relação entre valores calculados e medidos, em comparação com o método de Anjos & Sousa (2012). Entre os métodos citados anteriormente, alguns foram desenvolvidos especificamente para estacas hélice contínua, enquanto outros consistem em adaptações dos

métodos originais, com ajustes nos coeficientes, como é o caso do método de Décourt & Quaresma (1996), originalmente desenvolvido para estacas pré-moldadas de concreto, mas adaptado para hélice contínua. No método de Aoki & Velloso – cujos valores de F1 e F2 para estacas hélice contínua foram introduzidos por Velloso & Lopes (2002) e posteriormente discutidos por Cintra & Aoki (2010) – observa-se uma abordagem semelhante à de outros métodos semiempíricos. Alonso (2013) ressalta, entretanto, que tais métodos "não são universais", enfatizando que a aplicação da previsão de capacidade de carga deve ser restrita aos solos da região em que foram originalmente desenvolvidos. Qualquer reavaliação ou adaptação do método para novas condições geotécnicas deve ser validada por meio de um conjunto representativo de provas de carga estática no local.

A capacidade de suporte axial de fundações pode ser estimada por métodos analíticos, baseados nas propriedades do solo obtidas em ensaios laboratoriais ou de campo (*in situ*), por métodos dinâmicos (equação da onda) ou diretamente a partir de resultados de provas de carga. Esta capacidade depende do peso da fundação (W), da resistência lateral ao longo do fuste ($Q_l$) e da resistência na base ($Q_b$). Considerando o equilíbrio de forças, a capacidade axial à compressão ($Q_t$) é definida pela Equação (1), sendo que, tipicamente, o peso próprio da fundação é desprezado na avaliação final. Incorpora-se, ainda, a definição de "ruptura" como sendo correspondente à carga que provoca recalque no topo da estaca equivalente a 10% de seu diâmetro.

$$Q_t = Q_l + Q_b - W = (\beta . q_l . A_l) + (\alpha . q_b . A_b) - W \quad (1)$$

onde $q_l$ é a resistência lateral unitária; $q_b$ é a resistência de ponta unitária; $A_l$ e $A_b$ são as áreas lateral e da base da fundação, respectivamente; "α" (base) e "β"(fuste) são os coeficientes da metodologia, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes α e β – Método de Décourt & Quaresma (D&Q)

| TIPO DE SOLO | TIPO DE ESTACA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Escavadas em Geral | | Escavada (Bentonita) | Hélice Contínua | Estaca Raiz | Injetada Sob Altas Pressões |
| Argilas | α | 0,85 | 0,85 | 0,30* | 0,85* | 1,00* |
| | β | 0,80 | 0,90* | 1,00* | 1,50* | 3,00* |
| Solos Intermediários | α | 0,60 | 0,60 | 0,30* | 0,60* | 1,00* |
| | β | 0,65 | 0,75* | 1,00* | 1,50* | 3,00* |
| Areias | α | 0,50 | 0,50 | 0,30* | 0,50* | 1,00* |
| | β | 0,50 | 0,60* | 1,00* | 1,50* | 3,00* |

*valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis

O coeficiente de segurança global estabelecido pela ABNT NBR 6122/2022 é igual a 2,0. Entretanto, no método D&Q são propostos fatores de segurança parciais para a resistência de ponta (base) ($F_{SB} = 4$) e para o atrito lateral ($F_{SL} = 1,3$). Assim, a carga admissível adotada da estaca ($Q_{adm}$) será o menor dos valores calculados em ambos os critérios (Fatores de Segurança Parciais e Fator de Segurança Global).

### 2.1 Exaustivo estudo em amplo banco de dados – Quais métodos merecem maior atenção?

Os dois primeiros autores desse artigo têm conduzido estudos recorrentes sobre a avaliação da capacidade de carga de estacas hélice contínua, dada a complexidade e relevância do tema, considerando fatores como influência do equipamento, operador e pressão de injeção na resistência final da estaca. Frente à diversidade de métodos disponíveis na literatura geotécnica, surgem questionamentos pertinentes: qual método apresenta melhor desempenho e quais poderiam ser aplicados entre os citados neste trabalho? Os estudos de Anjos & Sousa (2012) e Anjos & Andrade (2018; 2020) apresentam análises baseadas em 100 e 140 provas de carga, respectivamente, utilizando como principal ferramenta estatística o *Ranking Distance* (RD) para avaliação comparativa dos métodos. O presente estudo aplica um conjunto abrangente de ferramentas estatísticas para classificação e ranqueamento das diferentes metodologias de previsão de capacidade de carga de estacas. Ao todo, foram utilizadas 20 ferramentas distintas, empregadas tanto para avaliação comparativa quanto para a determinação de coeficientes capazes de otimizar a correspondência entre valores calculados e

medidos. Essa abordagem se justifica pela possibilidade de diferentes métricas – como $r^2$, MAE, RMSE, entre outras – fornecerem conclusões distintas ao comparar grandezas previstas e observadas. As ferramentas utilizadas incluem: Índice de Referência; Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe; Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE); Índice de Performance; Índice de Legate & McCabe; Erro Absoluto Médio (MAE); Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado; Incerteza Expandida (U95); Índice de Mielke Modificado; Índice de Concordância de Willmott; Probabilidade LogNormal; Erro Percentual Absoluto Médio; Coeficiente de Determinação ($r^2$); Probabilidade Normal; Ranking Index; Raiz do Erro Percentual Quadrático Médio; Ranking Distance; Variância Explicada; Erro Percentual Absoluto Mediano; e Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático.

A definição de cada método estatístico é de fácil obtenção, conforme indicado nos trabalhos citados anteriormente. Atualmente, os métodos que apresentam melhor desempenho estatístico são: Décourt & Quaresma (1996), Alonso (SP) (1996), Antunes & Cabral (máx) (1996), Monteiro (1997), Gotlieb et al. (2000), Alonso (ES) (2000) e Anjos & Andrade (2020). É importante destacar que o método de Antunes & Cabral (1996) sugere uma faixa de coeficientes para fuste e base, sendo que o melhor desempenho é obtido quando se utilizam os valores máximos: para o fuste, 5 kPa em areia e 3,5 kPa em silte e argila; para a base, 250 kPa em areia e 200 kPa em silte e argila, mantendo a proposta original dos autores. Este método foi um dos primeiros a estabelecer um limite de 4 MPa para a resistência unitária de base ($q_b$). De forma semelhante, Alonso (1996) também recomenda a limitação da resistência lateral. Os autores deste estudo defendem que tais limites deveriam ser explicitados em todas as metodologias de dimensionamento de estacas – desde estacas cravadas até estacas escavadas (seca, raiz, hélice ou de grande diâmetro) – tanto para a componente lateral quanto para a resistência de base.

Conforme o item 8.2.1.2 da NBR 6122/2022, transcrito parcialmente: "*Na análise das parcelas de resistência de ponta e atrito lateral, é necessário levar em conta a técnica executiva e as peculiaridades de cada tipo de estaca ou tubulão.* Ainda, *"O projeto de estacas escavadas com estabilização das paredes auxiliada por fluido estabilizante, bem como de estacas hélice contínua, deve, sempre que considerar a contribuição da resistência de ponta, fazer menção explícita a esse critério. O executor deve, antes da execução, assegurar que são cumpridos os procedimentos executivos mínimos, especificados nos Anexos J e N, de forma a obter o contato efetivo entre a ponta da estaca e o solo competente ou rocha."*. Em um contexto de pouca disponibilidade de provas de carga instrumentadas, a determinação da norma pode ser considerada um tanto "exagerada", sugerindo, como critério inicial, a adoção de um valor limite para a resistência unitária de base ($q_b$) em projetos correntes. A limitação das parcelas de resistência lateral ($q_l$) e de base ($q_b$) representa uma medida prudente e a favor da segurança, em que pese o pouco rigor com que as formulações são avaliadas nas "planilhas de cada um". Por fim, observa-se que o método de Aoki & Velloso, quando adaptado para estacas hélice contínua, apresenta desempenho estatístico inferior em comparação aos demais métodos analisados. Apesar disso, sua aplicação permanece disseminada nos escritórios de projetos, sendo recomendada, em princípio, sua manutenção para validações locais, de modo a confirmar a adequação do método às condições geotécnicas específicas de cada região.

Os métodos que apresentam melhor desempenho estatístico são, de forma consistente, aqueles desenvolvidos especificamente para o tipo de estaca em questão – neste caso, estacas hélice contínua – e não versões adaptadas de outros tipos de estacas. O método de Anjos & Andrade (2018; 2020) constitui uma versão aprimorada em relação à de 2012, especialmente no que se refere ao emprego de ferramentas estatísticas mais avançadas. Diversas ferramentas foram testadas até a formulação da versão atual, e uma abordagem semelhante será aplicada à Região Metropolitana de Belém (RMB), considerando um conjunto de 50 provas de carga para validação e análise comparativa.

## 3 BANCO DE DADOS DE PROVAS DE CARGA NA RMB

O conjunto de provas de carga utilizado neste estudo foi composto por 50 ensaios, sendo 42 do tipo PCE (Prova de Carga Estática) e 8 do tipo ECD (Ensaio de Carregamento Dinâmico). Os diâmetros das estacas variaram de 30 a 80 cm, com predominância entre 40 e 60 cm, enquanto o comprimento oscilou entre 8,2 m e 29,5 m, resultando em esbeltezes (L/D) no intervalo entre 17 e 49. A carga de trabalho das estacas ensaiadas variou de 220 kN a 2590 kN, e o recalque correspondente à carga de trabalho situou-se entre 0,48 mm e 10,2

mm. A Figura 1 apresenta a região de interesse dos ensaios, abrangendo os municípios de Belém, Ananindeua e Marituba. Quanto à estratigrafia, a distribuição das frações de solo observadas foi: 29% areia siltosa, 19% silte arenoso, 16% areia, 12% argila silto arenosa, 10% argila siltosa, 6% argila arenosa, 3% silte areno-argiloso, 2% areia silto argilosa, 2% argila, 1% argila areno-siltosa e 1% silte argilo-arenoso. Em termos agregados, a matriz do solo corresponde a 47% arenosa, 31% argilosa e 23% siltosa. Frações como silte/silte argiloso ou areia argilosa/areia argilo-siltosa não foram identificadas nos pontos sondados; caso venham a ocorrer em proporções representativas, a aplicação da metodologia proposta deve ser avaliada com cautela, considerando informações adicionais pertinentes ao problema.




Figura 1. Região metropolitana de Belém – RMB – Localização de provas de carga

## 4 EQUAÇÃO SUGERIDA PARA A RMB

Dentre as 20 ferramentas estatísticas previamente mencionadas, cada uma foi testada individualmente para identificar aquela que apresentasse maior representatividade estatística em relação aos resultados obtidos. A implementação do método foi realizada em ambiente Excel, com auxílio do *Visual Basic for Applications* (VBA), e segue a seguinte abordagem: inicialmente, os dados de entrada – incluindo diâmetro, comprimento, valores de $N_{spt}$ e estratigrafia em profundidade – são armazenados para cada caso de análise.

Um aspecto relevante é a validação do valor da carga limite (“ruptura”) a ser utilizada na determinação da capacidade de carga total ($Q_t$), conforme a Equação (1). As parcelas de resistências unitárias lateral ($q_l$) e de base ($q_b$) são descritas por equações do tipo $q_l = \mathbf{A}.N_{spt,f} + \mathbf{B}$ e $q_b = \mathbf{C}.N_{spt,b}$. A metodologia adotada por Anjos & Andrade (2018, 2020) e implementada em linguagem VBA busca automaticamente os valores das constantes **A**, **B** e **C**. Além disso, a metodologia propõe a utilização de medidas de tendência central – como média aritmética, mediana e média geométrica – as quais podem variar ao longo do fuste e da base, para a definição de valores representativos do índice $N_{spt}$, tanto para o fuste ($N_{spt,f}$) quanto para a base ($N_{spt,b}$). Há diferentes variações nos critérios de busca, considerando intervalos definidos em função do diâmetro (de 1D a 8D), a utilização de três pontos (em abordagem semelhante ao método D&Q) e, ainda, a inclusão ou não dos valores na base no cálculo das médias. Essas variações são aplicadas às medidas de tendência central adotadas, incluindo média aritmética, mediana e média geométrica.

As ferramentas (dentre as 20 avaliadas) são aplicadas de forma exaustiva e, após um tempo de processamento que varia conforme o número de provas de carga analisadas, obtêm-se como resultado as equações para $q_l$ e $q_b$, bem como seus respectivos coeficientes. A formulação de melhor desempenho foi obtida por meio da otimização do critério estatístico Mielke Modificado, cuja maximização (valores mais próximos da unidade) foi adotada como critério de ajuste. Esse procedimento permitiu determinar os coeficientes das equações apresentadas nas Equações (2) e (3), referentes à base e ao fuste, respectivamente.

$$q_b = 52{,}44.N_{spt,b}\ (kPa) \quad (2)$$

$$q_l = 1.N_{spt,f} + 47{,}52\ (kPa) \quad (3)$$

onde $N_{spt,b}$ é o equivalente à mediana dos valores de $N_{spt}$ entre a base da fundação e 3D abaixo da base e $N_{spt,f}$ é o equivalente à média geométrica dos valores de $N_{spt}$ ao longo do fuste, sem incluir os pontos usados na base.

Algumas observações sobre as equações propostas, visando maximizar a clareza e o entendimento, são apresentadas a seguir: 1) As resistências $q_l$ (fuste) e $q_b$ (base) são inicialmente calculadas de forma independente e, posteriormente, combinadas na formulação final – conforme apresentado na Equação (1) – para validação da carga total; 2) O valor de $N_{spt,b}$ é determinado de forma direta, por meio da mediana, em função do diâmetro da estaca: para diâmetros de até 30 cm, utiliza-se apenas o valor de $N_{spt}$ na profundidade correspondente à base da estaca; para diâmetros entre 35 e 60 cm, adota-se a mediana entre o valor de $N_{spt}$ na base e o valor imediatamente inferior; para diâmetros entre 70 e 90 cm, considera-se a mediana entre o valor na base e os dois valores imediatamente abaixo; para diâmetros superiores a 100 cm, utiliza-se a mediana entre o valor mais próximo da base e os três valores imediatamente inferiores. Os valores de $N_{spt,b}$ encontram-se no intervalo $5{,}5 \leq N_{spt,b} \leq 60$; 3) O valor de $N_{spt,f}$ é calculado como a média geométrica dos valores de $N_{spt}$ ao longo do fuste, desconsiderando o valor correspondente à profundidade da base. Os valores de $N_{spt,f}$ situam-se no intervalo: $7{,}64 \leq N_{spt,f} \leq 56$.

Ressalta-se que a escolha da mediana (base), da média geométrica (fuste) e dos respectivos coeficientes **A**, **B** e **C** integra a própria implementação do método. Assim, todos os parâmetros são definidos por critério objetivo, com base estatística, utilizando o critério de Mielke Modificado para maximização do ajuste, via *Solver* em planilha Excel. Para a obtenção de $q_l$ e $q_b$ (Equações (2) e (3)), o usuário apenas insere a geometria (diâmetro e comprimento), os valores de $N_{spt}$ e a estratigrafia representativa, além da carga total conforme o critério adotado (carga limite da prova de carga, extrapolação, entre outros). A Figura 2 apresenta os resultados para a metodologia proposta, sendo a reta tracejada a linha de igualdade entre valores calculados e medidos.

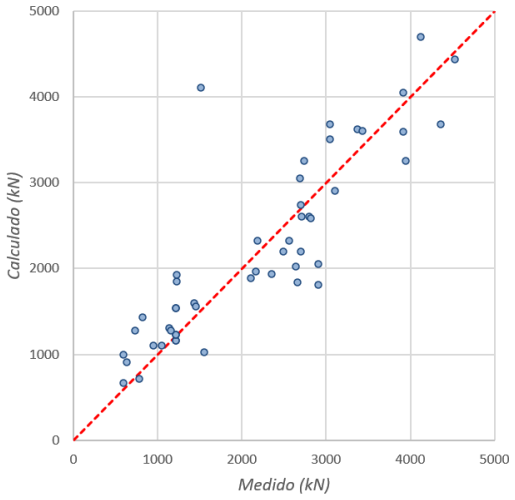



Figura 2. Valores calculados e medidos de $Q_t$ para a metodologia proposta

Tabela 2. Resumo de dados usados na Metodologia sugerida para a RMB

| | D (m) | L (m) | L/D | $N_{spt_f}$ | $N_{spt_b}$ | $q_l$ (kPa) | $q_b$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Mínimo* | 0,30 | 8,25 | 16,9 | 7,64 | 5,5 | 55,2 | 0,29 |
| *Máximo* | 0,80 | 29,5 | 49,2 | 56,08 | 60,0 | 103,6 | 3,15 |
| *Média* | 0,52 | 16,41 | 31,2 | 18,54 | 37,6 | 66,1 | 1,97 |
| *Desvio Padrão (DP)* | 0,11 | 6,69 | 8,8 | 11,85 | 16,7 | 11,8 | 0,87 |
| *LI (média + 1 DP)* | 0,41 | 9,72 | 22,3 | 6,69 | 20,9 | **54** | **1,1** |
| *LS (média + 1 DP)* | 0,63 | 23,10 | 40,0 | 30,38 | 54,2 | **78** | **2,8** |

A Figura 2 indica que pontos abaixo da linha tracejada representam situações a favor da segurança (Calculado < Medido), correspondendo a 44% das provas de carga na metodologia proposta. A metodologia também fornece faixas de valores para $q_l$ e $q_b$ (Tabela 2), além de estatísticas como média, desvio padrão e limites inferior (LI = média - 1DP) e superior (LS = média + 1DP). Sugere-se a aplicação do método limitando os valores de $q_b \leq 2{,}8$ MPa e $q_l \leq 78$ kPa (80 kPa para efeitos práticos), evitando extrapolações fora do intervalo analisado. Quanto aos demais métodos semiempíricos, a Figura 3 mostra aqueles que apresentaram melhor desempenho estatístico na estimativa da capacidade de carga. É possível também classificar os métodos quanto à relação Calculado/Medido (K), sendo valores inferiores a 1 a favor da segurança. A seguir, são mostradas as metodologias, com a respectiva porcentagem de casos que resultaram K<1 (Calculado < Medido). Os resultados obtidos foram os seguintes: Metodologia proposta – 44%; Anjos & Andrade (2020) – 14%, D&Q (1978/1996) – 26%, Monteiro (1997) – 20%, Gotlieb et al. (2000) – 8%, Alonso (SP) (1996) – 6%, A&C (máx) (1996) – 4%, Alonso (ES) (2000) – 2% e A&V (1975/2010) – 10%. Por exemplo, o método de D&Q apresenta apenas 26% dos pontos a favor da segurança, enquanto que Anjos & Andrade apresenta 14% dos pontos a favor da segurança. De modo geral, o uso direto desses métodos semiempíricos são, portanto, contra a segurança para a RMB, quando comparados na relação entre valores medidos (eixo x) e calculados (eixo y).

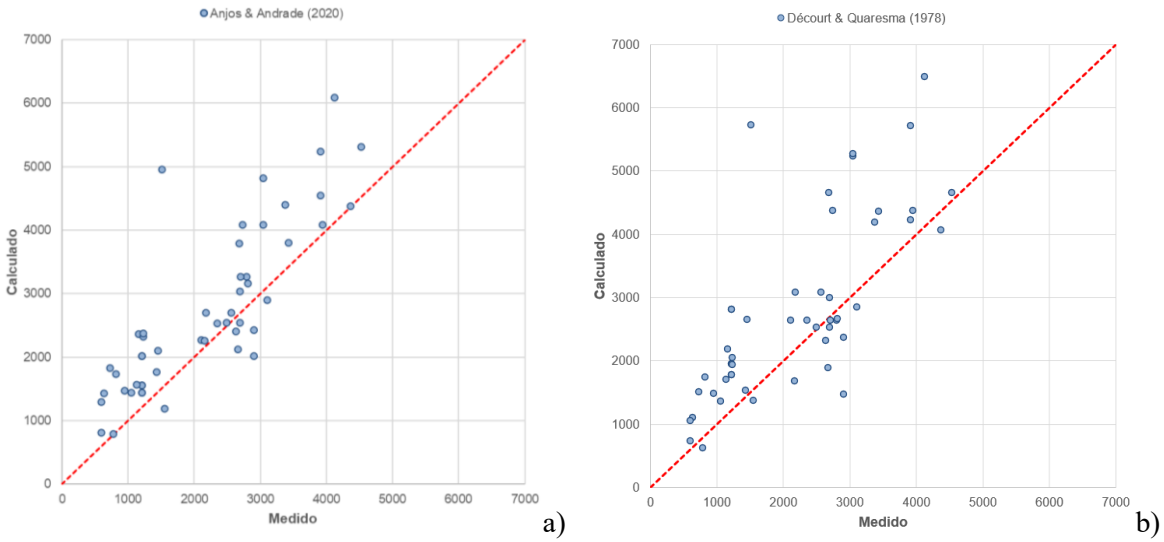



Figura 3. Valores calculados e medidos para Anjos & Andrade (2020) e D&Q para a RMB

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a estimativa da capacidade de carga à compressão de estacas do tipo hélice contínua, baseada na análise de 50 provas de carga realizadas na Região Metropolitana de Belém. A partir de uma avaliação estatística utilizando 20 ferramentas distintas, foi estabelecido um ranqueamento que evidencia a superioridade do método proposto em relação aos principais métodos empregados na geotecnia de fundações no Brasil.

A ordem de desempenho obtida foi: (1) Método proposto (EHC_RMB), (2) Anjos & Andrade (2020), (3) Décourt & Quaresma (1978; 1996), (4) Monteiro (1997), (5) Gotlieb et al. (2000), (6) Alonso (SP) (1996), (7) Alonso (ES) (2000), (8) Antunes & Cabral (máx) (1996) e (9) Aoki & Velloso (1975).

Análises complementares realizadas também permitiram a definição de coeficientes de ajuste para melhoria do desempenho estatístico dos métodos. Para o método de Anjos & Andrade (2020), obteve-se coeficiente igual a 0,785, enquanto para o método proposto (EHC_RMB) o valor foi de 0,968, ambos aplicáveis à carga total estimada (Qt).

Destaca-se que, para a maioria dos métodos tradicionalmente empregados (com exceção do método proposto), os valores calculados tendem a superar os valores medidos, caracterizando uma condição contra a segurança para a RMB. Tal comportamento reforça a necessidade de cautela na aplicação dessas metodologias, sobretudo por não capturarem adequadamente variabilidades associadas à estratigrafia local, às condições operacionais e aos parâmetros executivos, fatores determinantes na resposta de estacas hélice contínua.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Alonso, U.R. (2000a). Contribuição para a formação de um banco de dados de provas de carga de estacas hélice contínua, SEFE IV, São Paulo, SP, 2: 430-450.

Alonso, U.R. (2000). Reavaliação do método de capacidade de carga de estacas hélice contínua proposto por Alonso em 96 para duas regiões geotécnicas distintas. IV SEFE, São Paulo: ABMS. Vol. 2, pp.425-429.

Alonso, U.R. (2013). Capacidade de carga de estacas comprimidas tipo hélice contínua executadas em folhelhos. I Conferência em Tecnologia de Fundações (CTF), Campinas-SP. 1 CD-ROM. 11p.

Anjos. G.J.M, Sousa, M.A.P. (2012). Formulação da Capacidade de Suporte para Estacas Hélice Contínua Monitorada Baseada em Resultados de 100 Provas de Carga. In: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2012, Porto de Galinhas / PE.

Anjos, G. J. M., Andrade, M. S. (2018). Sobre a carga total de estacas hélice contínua baseada em resultados de 140 provas de carga. In XIX Cobramseg, Setembro, Salvador, Bahia, Brasil.

Anjos, G. J. M., Andrade, M. S. (2020). Comunicação pessoal – Estudo da estaca hélice com estatísticas.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. Projeto e execução de fundações – RJ.

Antunes, W.R., Cabral, D.A. (1996). Capacidade de carga de estacas Hélice Contínua, SEFE III (02) -105

Aoki, N., Velloso, D.A. (1975). An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. V PACSMFE, Bueno Aires.

Cintra, J. C.; Aoki, N. (2010) Fundações por estacas: Projeto geotécnico. Oficina de Textos; São Paulo; 96 p., 2010.

Costa, T. C. D. D. (2001). Análise crítica das metodologias gerais de mapeamento geotécnico visando formulação de diretrizes para a cartografia geotécnica no trópico úmido e aplicação naregião metropolitana de Belém escala 1:50.000. 256 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica), UFPa, Belém.

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.

Décourt, L., Albiero, J. H. & Cintra, J. C. A. (1996). Análise e Projeto de Fundações Profundas. Fundações: Teoria e Prática, Hachich, w., Falconi, f., Saes, J.L., Frota, R.G.Q., Carvalho, C.S. & Niyama, S. (eds).

Francisco, G. M. et al. (2004). Uma avaliação de métodos de previsão da capacidade de carga de estacas hélice contínua. In: SEFE, São Paulo, 2004. Anais São Paulo, 2004.

Gotlieb, M., Penna, A.S.D., Romano Jr., R., Rodrigues, L.H.B. (2000). Um Método Simples para a Avaliação da Tensão Admissível no Topo de Estacas Tipo Hélice Contínua. IV SEFE, Vol. 01 p(312-319).

Karez, M.B. & Rocha, E.A.C. (2000). Estacas tipo hélice contínua previsão da capacidade de carga. 4° Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 1: 274 - 278.

Monteiro, P.F., (1997). Capacidade de carga de estacas – Método Aoki-Velloso, Relat. Estacas Franki Ltda.

Sales, M.M., Mendes, K.C., Moreira, M.C., Viana, P.A.F. (2004). Estaca Hélice-Contínua Monitorada: Avaliação do Desempenho de Alguns Métodos Empíricos na Previsão da Capacidade de Carga. SEFE V

Velloso, D.A., Lopes, F.R. (2002). Fundações. Volume 2 – Fundações Profundas. COPPE/UFRJ, 471 p.

Vorcaro, M. C. & Velloso, D.A. (2000). Avaliação de carga última em estacas escavadas por regressao Linear. 4° SEFE, São Paulo, SP, 2: 331 - 344.