DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/29

Avaliação das Metodologias de Previsão de Capacidade de Carga em Estacas Carregadas Lateralmente

Fabrício Jackson Fonseca de Azevedo
Egresso do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, fabjack7@gmail.com

Carina Silvani
Doutora professora do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Vitor Braga de Azevedo
Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

Rogério Albuquerque Cunha Júnior
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, ra7463892@gmail.com

Thiago Lucena Dias
Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, thiago.lucena.dias@gmail.com

RESUMO: Elementos de fundação profunda, como estacas, são frequentemente solicitados por esforços horizontais significativos, notadamente em estruturas de contenção, encontros de pontes, plataformas *offshore* e torres de transmissão. A análise de estacas sob carregamento horizontal introduz uma complexidade elevada no dimensionamento, devido às incertezas na modelagem da interação solo-estrutura e na resposta não-linear do solo. Os métodos de cálculo semi-empíricos recorrem a simplificações consideráveis para viabilizar a análise. Contudo, a aferição do comportamento real da estaca depende da execução de provas de carga estáticas laterais em escala real, um procedimento de alto custo e geralmente restrito a obras de grande porte. Neste contexto, esse estudo buscou comparar métodos semi-empíricos de previsão de capacidade de carga de estacas carregadas horizontalmente com provas de carga. A capacidade de carga horizontal de estacas em solo residual foi avaliada utilizando os métodos de Broms (1964a, 1964b) e a solução elástica de Matlock e Reese (1960). Os modelos foram alimentados por parâmetros de solo derivados de correlações semi-empíricas com dados de SPT e CPTu, referentes a um perfil de solo residual argiloso do Estado do Rio Grande do Sul. Os resultados previstos para deslocamentos de 10, 50 e 100 mm foram, então, validados contra provas de carga estáticas horizontais da literatura. Como conclusão obteve-se que o método de Broms é indicado para maiores deslocamentos (50 e 100 mm), e o método da solução elástica tem solução mais próxima da prova de carga para baixos deslocamentos (10 mm). Ainda, em linhas gerais, o método de Broms foi o que melhor conseguiu prever a capacidade de carga lateral para o perfil de solo estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Interação solo-estrutura, prova de carga estática, métodos semiempíricos, solo residual.

ABSTRACT: Deep foundation elements, such as piles, are often subjected to significant horizontal loads, particularly in retaining structures, bridge abutments, offshore platforms, and transmission towers. The analysis of piles under horizontal loading introduces considerable complexity in design due to uncertainties in modeling the soil–structure interaction and the nonlinear response of the soil. Semi-empirical calculation methods rely on substantial simplifications to make the analysis feasible. However, verification of the actual pile behavior depends on the execution of full-scale static lateral load tests, a high-cost procedure generally

limited to large-scale projects. In this context, this study aimed to compare semi-empirical methods for predicting the load capacity of laterally loaded piles with load test results. The horizontal load capacity of piles in residual soil was evaluated using the methods of Broms (1964a, 1964b) and the elastic solution of Matlock and Reese (1960). The models were supplied with soil parameters derived from semi-empirical correlations with SPT and CPTu data from a clayey residual soil profile in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The predicted results for displacements of 10, 50, and 100 mm were then validated against static lateral load tests reported in the literature. The conclusions indicated that the Broms method is more suitable for larger displacements (50 and 100 mm), whereas the elastic solution method provides results closer to the load test for small displacements (10 mm). Overall, the Broms method showed the best performance in predicting the lateral load capacity for the soil profile studied.

KEYWORDS: Soil–structure interaction, static load test, semi-empirical methods, residual soil.

1 INTRODUÇÃO

A determinação confiável da capacidade de carga de fundações profundas é um aspecto fundamental do projeto geotécnico, pois condiciona simultaneamente a segurança estrutural e a otimização econômica das obras. Nesse contexto, as estacas tipo hélice contínua (CFA ou HC) têm sido amplamente empregadas em edificações e infraestrutura devido à rapidez de execução, ao controle tecnológico durante a concretagem e à menor perturbação do solo circundante. Estudos recentes indicam que o desempenho dessas estacas está fortemente associado às características geotécnicas locais e à adequada avaliação da interação solo-estrutura, especialmente quando combinada com dados experimentais obtidos em campo (Sui *et al*., 2024; Li; Zhang; Wang, 2022).

A estimativa da capacidade de carga dessas fundações ainda se baseia, em grande parte, em métodos semiempíricos derivados de correlações com ensaios *in situ*, como o *Standard Penetration Test* (SPT) e o *Cone Penetration Test* (CPT). No Brasil, métodos clássicos como Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma e Antunes & Cabral permanecem amplamente utilizados em projetos de engenharia. Entretanto, pesquisas recentes têm demonstrado que as previsões fornecidas por esses métodos podem apresentar variações significativas quando comparadas a resultados obtidos em campo, especialmente em solos tropicais ou em perfis geotécnicos heterogêneos (Araújo; Araújo, 2023; Fonseca; Azevedo, 2023).

Estudos atuais apontam que a dispersão entre valores estimados e observados decorre não apenas das simplificações inerentes aos modelos semiempíricos, mas também da variabilidade natural dos solos e das condições executivas das estacas. Nesse cenário, as provas de carga estática (PCE) desempenham papel essencial como instrumento de validação experimental, permitindo avaliar o comportamento carga-recalque e calibrar métodos de previsão utilizados em projeto. Pesquisas baseadas em bancos de dados de PCE indicam que a integração entre análises estatísticas e métodos tradicionais pode reduzir incertezas e aprimorar o dimensionamento de fundações profundas (Silva *et al*., 2024; Almeida; Gusmão; Lima, 2021).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a capacidade de carga de estacas hélice contínua a partir da aplicação de métodos semiempíricos consagrados e da comparação com resultados experimentais de provas de carga estática. Buscou-se discutir as limitações e incertezas associadas a essas metodologias, bem como contribuir para o aprimoramento da confiabilidade das previsões de capacidade resistente em projetos geotécnicos.

2 METODOLOGIA

2.1 Campo Experimental

O campo experimental fica localizado no Bairro São José na cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, ao lado do Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura (CETEC) na Universidade de Passo Fundo (UPF). O subsolo da região é constituído por solo residual de basalto. A caracterização estratigráfica realizada por Lopes Júnior e Thomé (2005), fundamentada pela sondagem à percussão (SPT) (Figura 1), evidencia um depósito de solo essencialmente argiloso, marcado por uma consistência uniforme abaixo da cota de -4,0 m. A zona superficial (0 a 4 m) destaca-se pela reduzida resistência à cravação do

amostrador padrão. Até a profundidade final investigada, não houve ocorrência de nível d'água. Born (2019) realizou ensaios de penetração de cone (CPT) no campo experimental. Utilizou-se uma ponteira com geometria padrão, apresentando área de base de 10 cm^2 e luva de atrito padrão. Os procedimentos de campo seguiram a diretriz ASTM D5778-12, ressaltando-se que, nesta campanha, não houve registro de poropressões. Ao todo, foram executadas 5 sondagens, atingindo profundidades de até 20 m. A Figura 2 expõe os resultados obtidos no CPT.

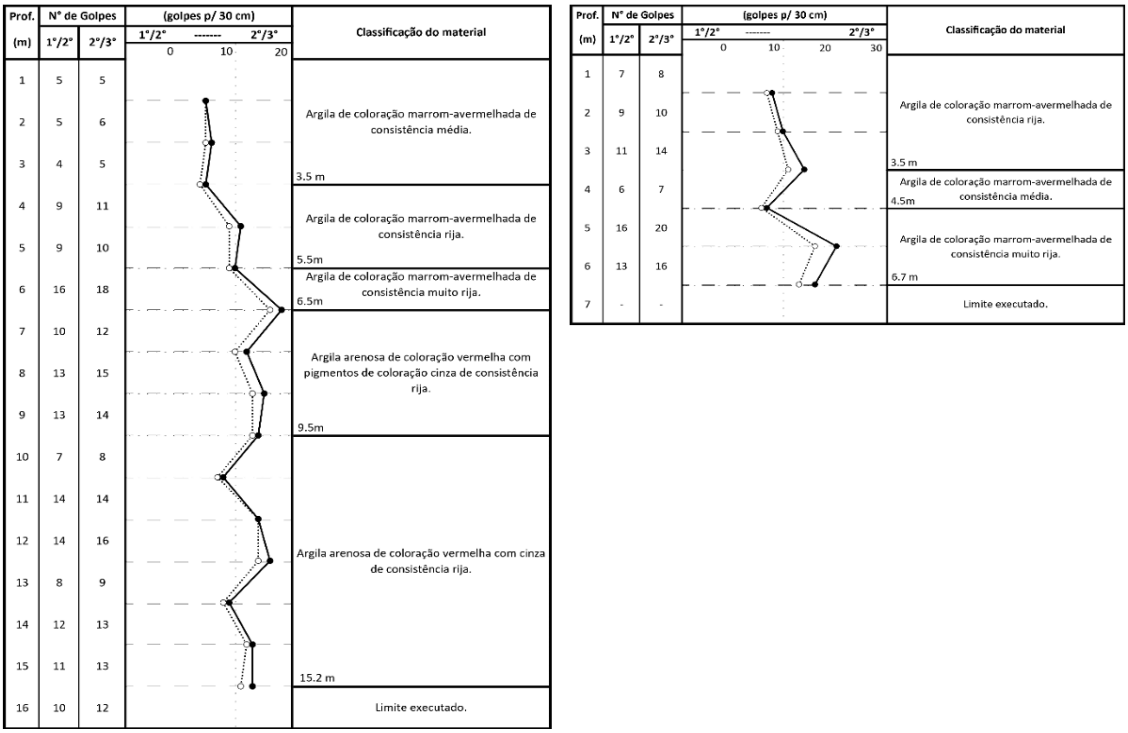


Figura 1. Sondagem SPT do campo experimental
Fonte: adaptado de Lopes Júnior e Thomé (2005)

2.2 Provas de carga ao esforço lateral

Born (2019) realizou provas de carga estáticas ao esforço lateral (Figura 2) em 4 estacas metálicas de perfil diferentes, denominadas de C1, C7, Q1 e H1. Os perfis metálicos foram confeccionados em aço Grau 50, ASTM A572/A572M (2025). As propriedades de referência para este aço são: tensão de escoamento (f_y) de 345 MPa e tensão de ruptura (f_u) de 450 MPa. As características das estacas estão dispostas na Tabela 1, sendo $L_{Útil}$ o comprimento enterrado, L_{Ext} o comprimento acima do nível do terreno e EI a rigidez à flexão da estaca.

Estaca	C1	C7	Q1	H1
Seção	Circular	Circular	Quadrado	Tipo H
Dimensão (m)	0,152	0,324	0,150	0,152
$L_{Útil}$ (m)	1,80	2,83	1,80	1,80
L_{Ext} (m)	0,20	0,18	0,20	0,20
EI (kN×m^2)	2196	19385	2420	2446
Q_{10mm} (kN)	16,0	16,0	15,0	11,0
Q_{50mm} (kN)	35,0	105,0	33,0	32,0
Q_{100mm} (kN)	43,0	117,0	35,0	37,0

Tabela 1. Propriedades das estacas ensaiadas na prova de carga
Fonte: adaptado de Born (2019)

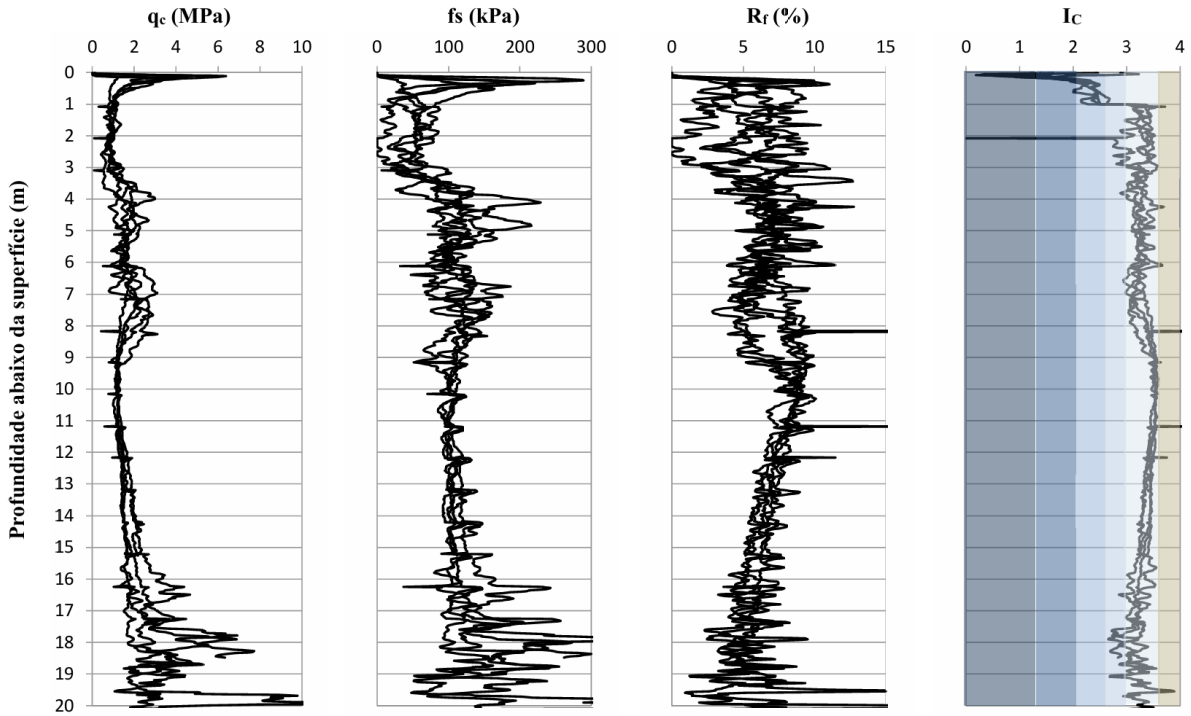


Figura 2. Sondagens CPT do campo experimental
Fonte: Born (2019)

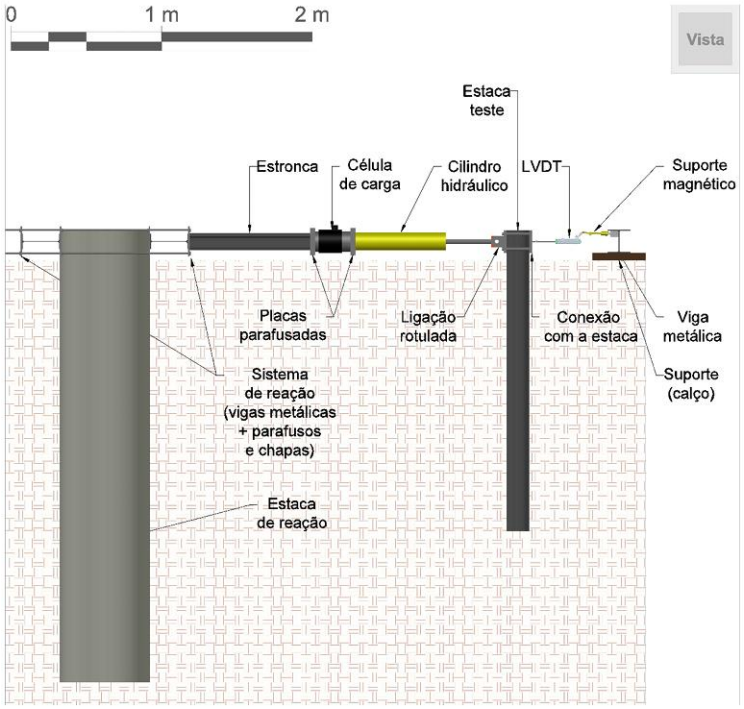


Figura 3. Esquema dos ensaios de prova de carga
Fonte: Born (2019)

Seguindo Born (2019), foi adotado o procedimento B da norma ASTM D3966 (2013). O protocolo experimental consistiu na aplicação de estágios de carga com magnitude limitada a 50% da carga de trabalho projetada, observando-se um tempo de manutenção de carga de, no mínimo, 20 minutos por estágio. A capacidade de carga real medida para 10, 50 e 100 mm de deslocamento lateral está disposta na Tabela 1.

2.3 Cálculo da capacidade de carga ao esforço lateral

A previsão da capacidade de carga das estacas submetidas a esforços laterais fundamentou-se no método de Broms (1964) e na abordagem da Solução Elástica. Para a definição dos parâmetros de entrada desses modelos, utilizaram-se correlações distintas e independentes, baseadas nos resultados dos ensaios SPT e CPT.

Para o emprego das metodologias de cálculo, faz-se necessária a definição dos parâmetros mecânicos do solo. A resistência não drenada (Su) foi determinada a partir dos dados de SPT segundo a proposição de Decourt (1989), conforme apresentado na Equação 1. A determinação do Su a partir do SPT possui limitações, porém, em situações de ausência de ensaios laboratoriais, essa expressão é frequentemente adotada em aplicações práticas (Schnaid; Odebrecht, 2012). Em relação ao ensaio CPT, a estimativa do Su baseou-se na metodologia de Schnaid e Odebrecht (2012) expressa na Equação 2.

$$Su = 10 \times N_{SPT} \quad (1)$$

$$Su = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (2)$$

O módulo de elasticidade (E) foi estimado com o SPT pela Equação 3, proposta por Sandroni (1991). Para o ensaio CPT foi utilizada a Equação 4 proposta por Schnaid e Odebrecht (2012). Complementarmente, o coeficiente de reação horizontal (k_h) foi determinado pela Equação 5, baseando-se nas recomendações de Terzaghi (1955) para argilas normalmente adensadas. Devido a ausência de correlações diretas e consolidadas para obtenção do E a partir do ensaio CPTu, foi adotada uma correlação do E com o Su. Essa abordagem implicou a aplicação sequencial de duas formulações semiempíricas, resultando no acúmulo inerente de incertezas. Não obstante, optou-se por manter essa premissa metodológica com o intuito de verificar a acurácia das estimativas quando baseadas exclusivamente em dados provenientes de ensaios de sondagem in situ.

$$E = 0{,}4 \times N_{SPT}^{1,4} \quad (3)$$

$$E = Su \times 700 \quad (4)$$

$$k_h = 67 \times Su \quad (5)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Capacidade de Carga Lateral pelo Método de Broms (1964)

A Figura 4 apresenta a relação Q_{calc}/Q_{med} (carga calculada/carga medida na prova de carga) estimada pelo método de Broms (1964), confrontando as previsões derivadas de correlações com SPT e CPT. A análise do fator de rigidez adimensional (produto do comprimento pela rigidez relativa) resultou, respectivamente para as estacas C1, C7, H1 e Q1, os valores de 1,414; 1,290; 1,378; 1,380 indicando que todas as estacas exibem comportamento rígido (estacas curtas), caracterizado pela rotação do corpo sem flexão significativa. A análise demonstra uma forte convergência entre os resultados, indicando que as estimativas obtidas via CPT corroboram as do SPT.

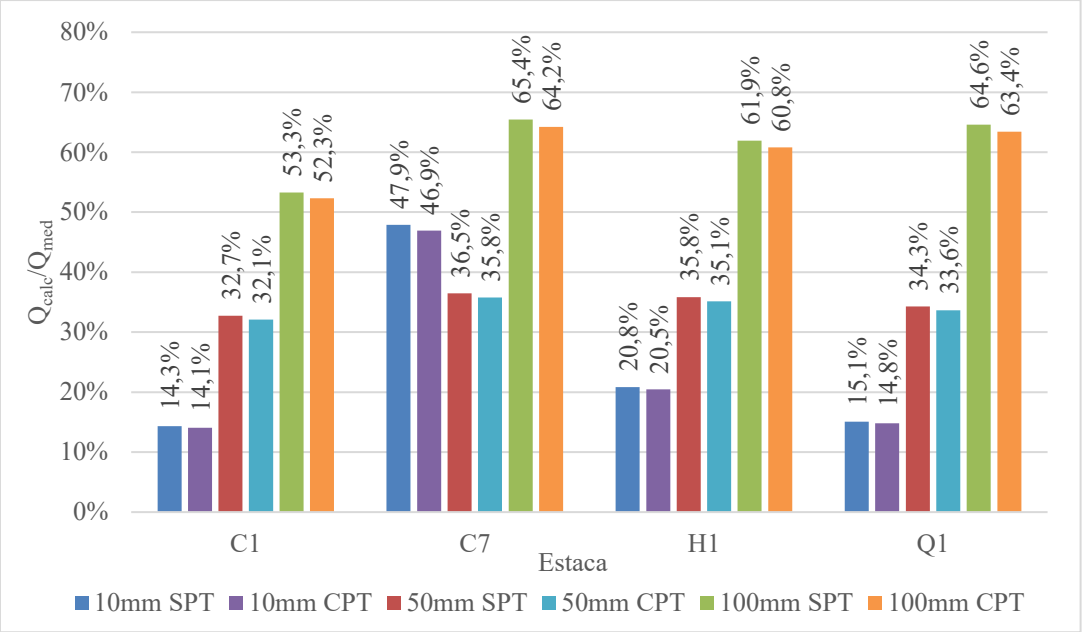


Figura 4. Comparativo da capacidade de carga lateral (Broms, 1964) derivada de correlações com SPT e CPT.

3.2 Capacidade de Carga Lateral pelo Método Elástico

A Figura 5 ilustra as relações Q_{calc}/Q_{med} baseadas na Teoria Elástica, contrapondo os resultados derivados de correlações com SPT e CPT. Observou-se uma discrepância média de 10% entre as duas fontes de dados. Embora essa variação seja ligeiramente superior à verificada no método de Broms (1964), ela é considerada marginal, indicando uma boa compatibilidade entre os parâmetros obtidos pelas diferentes investigações geotécnicas.

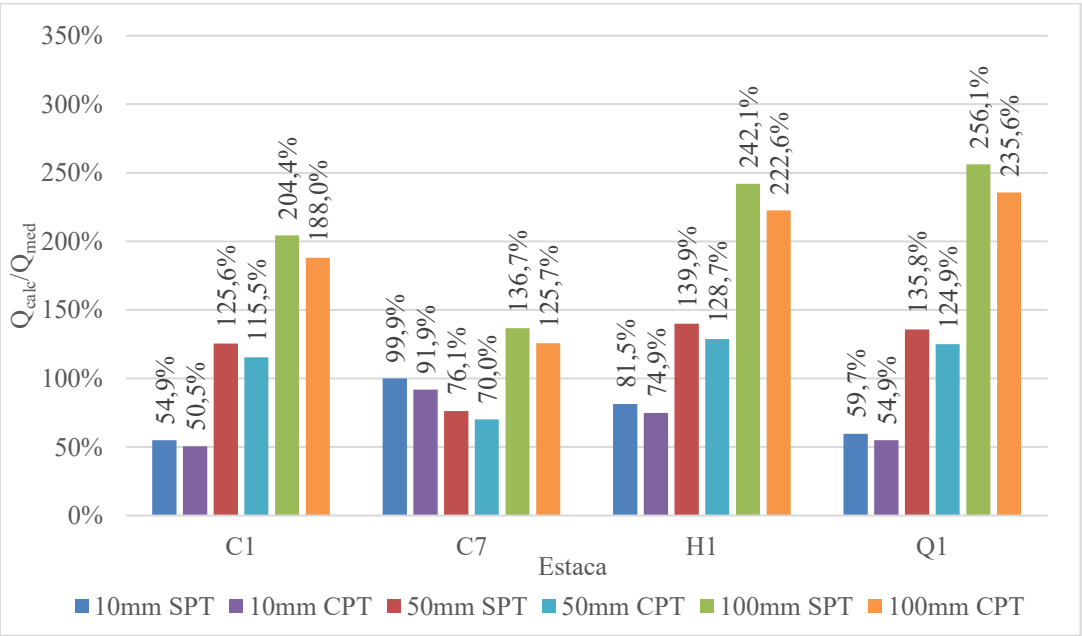


Figura 5. Comparativo da capacidade de carga lateral (Método Elástico) derivada de correlações com SPT e CPT.

3.3 Comparação entre métodos de previsão e prova de carga

O confronto entre as previsões teóricas e os valores experimentais obtidos por Born (2019) (Figura 4) revela a natureza conservadora do método de Broms para as condições analisadas. Observou-se uma correlação inversa entre a magnitude do deslocamento e o erro relativo. Para pequenos deslocamentos (10 mm) as divergências foram acentuadas, com a razão Q_{calc}/Q_{med} variando de 47,9% (Estaca C7) a 14,1% (Estaca C1), indicando baixa precisão para cargas de serviço. Entretanto, para grandes deslocamentos (100 mm), houve uma notável redução no erro (aproximação do 100%), para a faixa de 52,3% a 65,4%. A Estaca C7 apresentou a melhor aderência ao modelo, em especial para pequenos deslocamentos, com desvios menores. Conclui-se que o método de Broms, dentro do cenário estudado, tende a subestimar a rigidez inicial do sistema, tornando-se mais assertivo à medida que o solo se aproxima da ruptura (grandes deformações).

A comparação entre as previsões do Método Elástico e os resultados experimentais de Born (2019) (Figura 5) revela uma forte dependência do nível de deformação, para a situação estudada. Para pequenos deslocamentos (10 mm) o método apresentou sua melhor acurácia, com razões variando de 99,9% (Estaca C7, excelente aderência) a 50,5% (Estaca C1), confirmando a aplicabilidade da teoria elástica para prever o comportamento em serviço. Para deslocamentos médios (50 mm), observou-se uma tendência de superestimativa da carga para as estacas C1, H1 e Q1 (razão entre 155,5% e 139,9%). A exceção foi a Estaca C7, que manteve uma estimativa teórica cerca de 25% abaixo do experimental, provavelmente favorecida pela sua maior rigidez à flexão decorrente do diâmetro ampliado. Já para grandes deslocamentos (100 mm), o modelo mostrou-se inadequado, com superestimativas severas para todas as estacas (razão de 125,7% a 256,1%). Então, para o perfil de solo e tipo de estaca estudada, a linearidade do Método Elástico não consegue representar a degradação da rigidez do solo em grandes deformações, resultando em previsões contra a segurança para este estágio.

4 CONCLUSÕES

Com base na análise comparativa entre os métodos teóricos de previsão e os resultados empíricos obtidos na prova de carga ao esforço lateral, foi possível estabelecer as conclusões a seguir.

Constatou-se que a adoção de parâmetros advindos de ensaios SPT ou CPT resultou na convergência da capacidade teórica de carga lateral, mostrando consistência entre os diferentes caminhos metodológicos (expressões semiempíricas) adotados, para o perfil de solo e estacas estudados. Dentre os diferentes perfis metálicos avaliados, a resistência mobilizada manteve-se quase uniforme, com exceção da estaca C7. Esta estaca mobilizou uma resistência lateral sensivelmente superior, fator atribuído ao seu maior diâmetro.

Verificou-se que, para as condições estudadas, o método analítico de Broms tende a subestimar a rigidez inicial do sistema solo-estaca, resultando em elevado conservadorismo para a previsão de deslocamentos de estacas rígidas operando em regime de serviço. Contudo, constatou-se que o modelo se torna progressivamente mais acurado à medida que solo sofre deformações e se aproxima da ruptura. Ademais, observou-se que a premissa de linearidade inerente ao Método Elástico é estruturalmente incapaz de capturar a degradação da rigidez do maciço de solo sob grandes deformações. Consequentemente, o modelo subestima severamente os deslocamentos horizontais, resultando em previsões não conservadoras (contra a segurança) para estágios avançados de deslocamento.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da FAPESQ-PB, CAPES e CNPQ ao grupo de pesquisa. Ao Born pelos dados experimentais de prova de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M. S. S.; Gusmão, A. D.; Lima, A. P. Avaliação de métodos semiempíricos de previsão de capacidade de carga de estacas em solos tropicais. *Soils and Rocks*, São Paulo, v. 44, n. 2, 2021.

Araújo, F. S.; Araújo, R. C. Comparação da acurácia dos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma em relação a provas de carga na obtenção da capacidade de carga de estacas hélice contínua. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, v. 10, 2023.

ASTM International (2012). ASTM D5778-12: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils.

ASTM International (2013). ASTM D3966/D3966M-07(2013)e1: Standard Test Method for Deep Foundations Under Lateral Load.

ASTM International (2025). ASTM A572/A572M-25: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel.

Born, R. B. (2019) *Análise Experimental do Comportamento de Estacas Carregadas Lateralmente em um Solo Residual*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Broms, B. (1964a) Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90 (2), p. 27-63.

Broms, B. (1964b) Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90 (3), p. 123-156.

Broms, B. (1965) Design of laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 91 (SM3), p. 77-99.

Decourt, L. (1989) The Standard Penetration Test – State of Art Report. In: *Proceedings of the XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, v. 4.

Fonseca, J. F. G.; Azevedo, G. F. Uso de ensaios SPT na análise determinística e probabilística da capacidade de carga de fundações. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, Viçosa, v. 9, 2023.

Li, X.; Zhang, J.; Wang, Y. Behaviour and bearing capacity of continuous flight auger piles based on field load tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 148, 2022.

Lopes Jr., L. S. Thomé, A. (2005) Provas de carga estática em estacas escavadas de pequeno diâmetro, executadas na região de Passo Fundo, Rio Grande do Sul. In: *Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul – GEORS*, Passo Fundo. Anais... ABMS.

Sandroni, S. S. (1991) Young metamorphic residual soils. General report. In: *Proceedings of the 9th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Viña del Mar, Chile, v. 4, p. 1771-1778.

Silva, R. A.; et al. Avaliação da confiabilidade de estacas hélice contínua a partir de provas de carga estática. *ScientiaTec*, v. 11, n. 1, 2024.

Sui, Y.; Zhang, X.; Liu, J.; et al. Bearing characteristics of continuous flight auger piles in weathered soils. *Journal of Underground Space and Engineering*, v. 20, 2024.

Schnaid, F.; Odebrecht, E. (2012) *Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*. 2. ed., São Paulo: Oficina de Textos, 224 p.

Terzaghi, K. (1955) Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Géotechnique*, 5 (4), p. 297-326.