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/COBRAMSEG2026.5/79

Métodos de Capacidade de Carga Geotécnica à Compressão de Estacas em Ambiente *Offshore* Baseados no Ensaio de Cone(CPT)

Gustavo Vaz de Mello Guimarães
Professor, UFRJ, Macaé, Brasil, guimaraes@macae.ufrj.br

Lucas Marques Pires da Silva
Engenheiro Geotécnico, Benthic, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.silva@coc.ufrj.br

Filipe José de Oliveira
Engenheiro Civil, TRANSPETRO, Rio de Janeiro, Brasil, filipefjo@petrobras.com.br

Fernando Artur Brasil Danziger
Professor, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

RESUMO: A estimativa da capacidade de carga geotécnica à compressão de estacas é um tema amplamente valorizado na engenharia de fundações. Entre as abordagens mais difundidas, destacam-se os métodos semiempíricos baseados em correlações com ensaios de campo. Nesse contexto, especialmente no cenário *offshore*, o ensaio de cone (CPT), por apresentar elevada repetibilidade e menor dependência do operador, oferece vantagens em relação à sondagem à percussão com medida de N_{SPT}. Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa de três métodos semiempíricos para a estimativa da capacidade de carga à compressão de estacas: Aoki-Velloso (1975), UWA (2005) e NGI (2005). A análise baseia-se em um estudo de caso envolvendo uma estaca pré-moldada de seção quadrada, instalada em ambiente *offshore* em depósito constituído por areia fina siltosa, para a qual se dispõem resultados de uma prova de carga estática. Os resultados indicam que o método Aoki-Velloso (1975) subestima significativamente a capacidade de carga total, enquanto os métodos UWA (2005) e NGI (2005) apresentam melhor concordância com o valor de referência.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade de Carga à Compressão, Estacas, CPT, *Offshore*, Métodos semiempíricos.

ABSTRACT: Geotechnical compressive bearing capacity of piles is a highly valued topic in foundation engineering. Among the most widely used approaches, semi-empirical methods based on correlations with in situ tests stand out. In this context, particularly in offshore conditions, the cone penetration test (CPT), due to its high repeatability and reduced operator dependency, offers advantages over the standard penetration test (SPT). This paper presents a comparative assessment of three semi-empirical methods for estimating the compressive bearing capacity of piles: Aoki-Velloso (1975), UWA (2005) and NGI (2005). The analysis is based on a case study involving a square precast pile installed in an offshore environment within a silty fine sand deposit, for which static pile load test results are available. The results indicate that the Aoki-Velloso (1975) method significantly underestimates the total bearing capacity, whereas the UWA (2005) and NGI (2005) methods show better agreement with the reference value.

KEYWORDS: Compressive bearing capacity, Piles, CPT, Offshore, Semi-empirical methods

1 INTRODUÇÃO

A estimativa da capacidade de carga geotécnica à compressão de estacas constitui um dos temas centrais da engenharia de fundações, uma vez que pode influenciar diretamente as decisões de concepção e a viabilidade técnico-econômica de um empreendimento.

Nesse contexto, os métodos semiempíricos baseados em correlações com ensaios de campo são amplamente utilizados na prática da engenharia, em função de sua simplicidade de aplicação e do histórico de uso consolidado. Tradicionalmente, grande parte dessas metodologias foi desenvolvida a partir de resultados da sondagem à percussão com medida do índice N_{SPT}. No entanto, tais métodos apresentam limitações conhecidas, associadas à variabilidade do ensaio, à dependência do operador e à dificuldade de reprodução dos resultados, fatores que se tornam ainda mais relevantes em ambientes geotécnicos complexos ou em condições *offshore*.

O ensaio de cone (CPT), por sua vez, tem se destacado como uma alternativa mais robusta para a caracterização do subsolo, em especial em depósitos arenosos. Sua elevada repetibilidade, a menor influência do operador e a padronização internacional do procedimento de ensaio permitem a obtenção de parâmetros mais consistentes, favorecendo o desenvolvimento e a aplicação de metodologias de previsão da capacidade de carga com bases empíricas mais bem definidas. Além disso, o CPT é amplamente empregado em investigações geotécnicas *offshore*, onde as restrições operacionais tornam desejável a utilização de ensaios contínuos e automatizados.

Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma avaliação comparativa de três métodos semiempíricos para a estimativa da capacidade de carga geotécnica à compressão de estacas, baseados em resultados de ensaio CPT: Aoki-Velloso (1975), UWA (2005) e NGI (2005). A análise é conduzida a partir de um estudo de caso envolvendo uma estaca pré-moldada de seção quadrada, instalada em ambiente *offshore* em depósito constituído por areia fina siltosa, para a qual se dispõem resultados de uma prova de carga estática. O escopo do trabalho concentra-se na comparação entre as previsões fornecidas por cada método e o comportamento observado em campo, discutindo-se a adequação e as limitações de cada abordagem no contexto analisado. Os resultados obtidos permitem discutir a aplicabilidade e as limitações desses métodos no contexto *offshore*, contribuindo para o aprimoramento de práticas de projeto baseadas em CPT.

2 CAPACIDADE DE CARGA GEOTÉCNICA Á COMPRESSÃO COM BASE NO CPT

2.1 Método Aoki–Velloso (1975)

O método original de Aoki e Velloso (1975) foi apresentado no V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, realizado em 1975, na cidade de Buenos Aires.

A metodologia separa a capacidade de carga em duas parcelas: ponta e fuste – de acordo com o resultado do ensaio de cone mecânico. Além disso, o banco de dados utilizado originalmente foi baseado em estacas *onshore*, pré-moldadas de concreto, metálicas e do tipo Franki.

A equação 1 apresenta a fórmula utilizada para estimativa da capacidade de carga total a compressão com base nos dados do ensaio de CPT mecânico.

$$Q_{ult} = A_b \frac{q_{cone}}{F_1} + U \Sigma \frac{\tau_{cone}}{F_2} \Delta l \quad (1)$$

Onde:
Q_{ult} = resistência Total;
A_b = área da seção transversal da ponta ou base da estaca;
U = perímetro do fuste
ΔL = comprimento da estaca;
q_{cone} = resistência de ponta em unidades de tensão;
τ_{cone} = resistência lateral em unidades de tensão;
F_1 e F_2 = fatores de correlação.

2.2 Método UWA (2005)

O método UWA-2005, desenvolvido pela *University of Western Australia* (UWA), em Perth, e publicado em 2005. O método também separa a capacidade de carga em uma parcela de ponta e outra de fuste, sendo elaborado com base em dados obtidos a partir de provas de carga estáticas realizadas em estacas *onshore e offshore* cravadas, acompanhadas de ensaios de cone elétrico CPT. Os resultados foram publicados

separadamente para dois tipos de solos: areia e argila (Lehane et al. 2005 e Lehane et al. 2013, respectivamente). Vale destacar que o método apresenta uma versão denominada "completa" e uma versão "*offshore*". Além disso, a metodologia traz a possibilidade de considerar, ou não, o embuchamento da ponta da estaca na estimativa da capacidade de carga. Neste trabalho está apresentada a versão para solos arenosos (Lehane et al. 2005) e para estacas *offshore* (para maiores detalhes ver Oliveira, 2025).

2.2.1 Resistência Lateral

A equação 2 apresenta a fórmula utilizada para estimativa da resistência lateral à compressão para estacas *offshore* com base nos dados do ensaio de CPT elétrico.

$$\tau_f = \frac{f_t}{f_c}\left[0{,}03 q_c A_f^{\,0{,}3}\left[\max\left(\frac{h}{D}, 2\right)^{-0{,}5}\right]\right] tg\ \delta_f \qquad (2)$$

Onde:
τ_f = resistência lateral;
$ft\ /fc$ = relação entre tensão e capacidade de compressão., sendo 1,0 para compressão e 0,75 para tensão;
qc = resistência de ponta CPT em unidades de tensão;
Af = relação de área = $A_f = 1 - (D_i/D)^2$;
h/D = relação entre comprimento e lado da estaca;
δf = ângulo de cisalhamento da interface.

2.2.2 Resistência de Ponta

A equação 3 apresenta a fórmula utilizada para estimativa da resistência de ponta à compressão, considerando o fenômeno do embuchamento, para estacas *offshore* com base nos dados do ensaio de CPT elétrico.

$$q_{b,0.1} = 0{,}6 q_{c,avg} \qquad (3)$$

Onde:
$q_{b,0.1}$ = resistência de ponta;
qc,avg = média de qc 1m após a ponta da estaca.

A equação 4 apresenta a fórmula utilizada para estimativa da resistência de ponta à compressão, considerando a ponta aberta (sem embuchamento), para estacas *offshore* com base nos dados do ensaio de CPT elétrico.

$$q_{b,0.1}/q_{c,avg} = 0{,}15 + 0{,}45 A_f \qquad (4)$$

Onde:
$q_{b,0.1}$ = resistência de ponta;
qc,avg = média de qc 1m após a ponta da estaca;
Relação de área efetiva $A_{rb,eff}$ = 1,0 – FFR $(D_i/D)^2$;
FFR ≈ min $[1, (Di(m)/1{,}5^{0{,}2}]$.

2.3 Método NGI (2005)

O método NGI (2005)**,** desenvolvido pelo *Norwegian Geotechnical Institute*, em Oslo na Noruega, e publicado em 2005, constitui uma evolução das formulações propostas pela *American Petroleum Institute* (API, 1993) para a estimativa da capacidade de carga axial de estacas. A metodologia separa a capacidade de carga em parcelas de resistência de ponta e de atrito lateral, incorporando alterações significativas em relação à API (1993) e propondo correlações específicas para parâmetros considerados fundamentais para uma

previsão mais precisa do comportamento das estacas. O método foi elaborado a partir de um banco de dados composto por provas de carga estáticas em estacas cravadas (aço e concreto), executadas em diferentes tipos de solo, incluindo registros mais antigos baseados em sondagens com medidas de N_{SPT}, posteriormente integrados por meio de correlações, bem como uma parcela majoritária de ensaios acompanhados de ensaios de cone elétrico CPT. Os principais trabalhos que fundamentam o método foram apresentados por Clausen et al (2005) e Karlsrud et al (2005), sendo o NGI (2005) amplamente empregado em projetos *offshore* e em solos escandinavos, em função de sua robustez e aplicabilidade prática em fundações profundas. Destaca-se que o método também permite considerar, ou não, o embuchamento da ponta das estacas.

2.3.1 Resistência Lateral

A equação 5 apresenta a fórmula utilizada para estimativa da resistência lateral à compressão para com base nos dados do ensaio de CPT elétrico.

$$\tau_f = \max\left(Z/Lp_a\, Fd_f F_{a/g} F_{t/p} F_{load} F_{mat}, \tau_{min}\right) \quad (5)$$

Onde:
τ_f = resistência lateral; Z = profundidade da camada; L = comprimento da estaca;
p_a = pressão atmosférica; F_{D_r}= 2,1 (Dr − 0,1) 1,7; D_r = 0,4 ln (q_{c1N} /22);
q_{c1N} = resistência de ponta normalizada;
$F_{t/p}$ = 1,0 para ponta aberta e 1,6 para ponta fechada;
$Fload$ = 1,0 para tensão e 1,3 para compressão;
$Fmat$ = 1,0 para aço e 1,2 para concreto.

2.3.2 Resistência de Ponta

A equação 6 apresenta a fórmula utilizada para estimativa da resistência de ponta à compressão, considerando o fenômeno do embuchamento, com base nos dados do ensaio de CPT elétrico.

$$q_{b\,0,1} = F_{D_r}\, q_{c,tip} = 0{,}8\, q_{c,tip}(1 + 3{D_r}^2) \quad (6)$$

Onde:
$q_{b,0.1}$ = resistência de ponta; D_r = densidade relativa;
$q_{c,tip}$ = resistência de ponta em unidades de tensão.

A equação 7 apresenta a fórmula utilizada para estimativa da resistência de ponta à compressão, considerando a ponta aberta (sem embuchamento), com base nos dados do ensaio de CPT elétrico.

$$q_{b\,0,1} = min\left[engastado\; q_{b\,0,1}, rotulado\; q_{b\,0,1}\right] \quad (7)$$

Onde:
$q_{b,0.1}$ = Resistência de ponta; $q_{c,tip}$ = resistência de ponta em unidades de tensão.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Localização do Ambiente *Offshore* e Características da Estaca

O ambiente *offshore* analisado está localizado no leste dos Estados Unidos da América, no oceano Atlântico, cerca de 40 km da costa, no estado de Virginia. A lâmina d'água é de cerca de 25 metros e o solo é composto por camadas de uma areia fina e siltosa.

A estaca de concreto pré-moldada foi cravada a percussão e o elemento de seção quadrada, com lado de 610 mm, possui 16,8 m enterrados.

A figura 1 apresenta a localização do campo experimental, bem como um esquema mostrando a profundidade da lâmina d'água e o perfil do subsolo e as principais características da estaca.

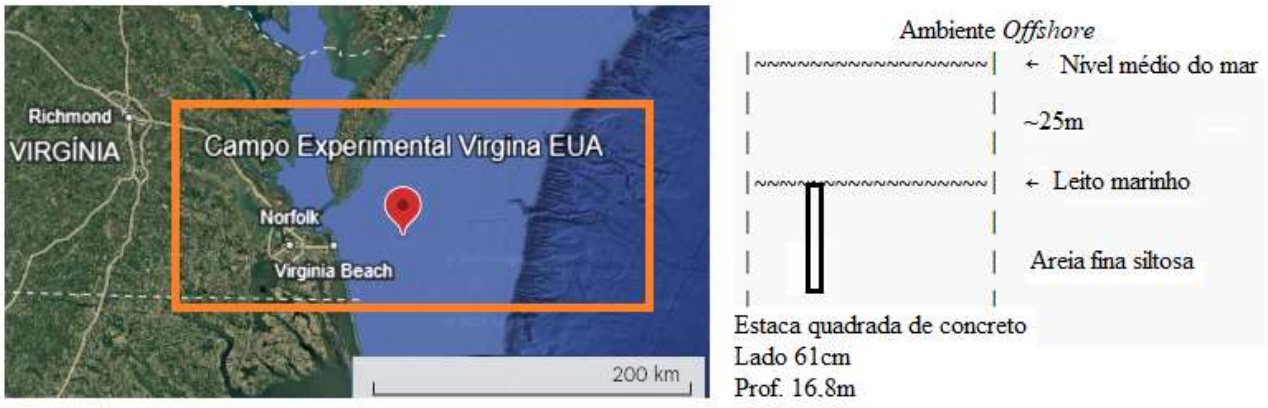


Figura 1. Campo experimental e caracteristicas do ambiente offshore estudado. Adaptado de https://earth.google.com/web/search/36°53′30″N+75°29′30″W, acessado em 03/01/2026

3.2 Resultados do Ensaio de Cone (CPT)

O ensaio de cone elétrico (CPT) foi executado em conformidade com a ASTM D5778 – *Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*, atendendo às recomendações relativas ao equipamento, à velocidade de cravação e aos procedimentos de aquisição e controle de qualidade dos dados. O ensaio foi realizado com cone elétrico instrumentado, permitindo o registro contínuo da resistência de ponta e do atrito lateral ao longo do perfil investigado. A figura 2 apresenta a resistência de ponta (qc) e a resistência lateral (fs) do ensaio realizado.

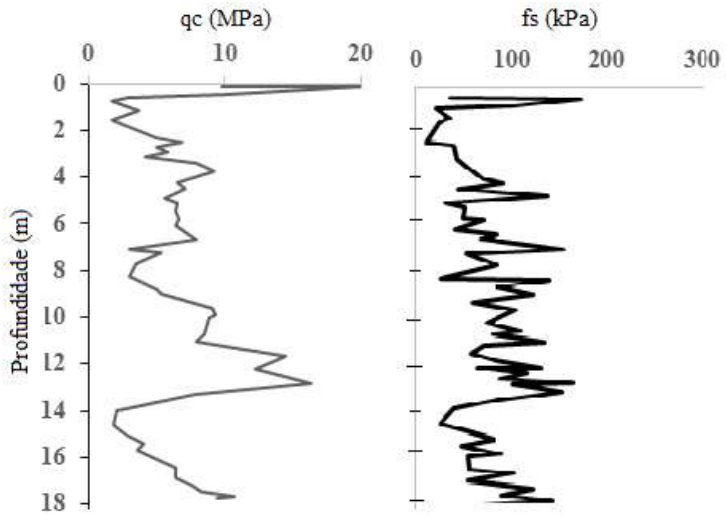
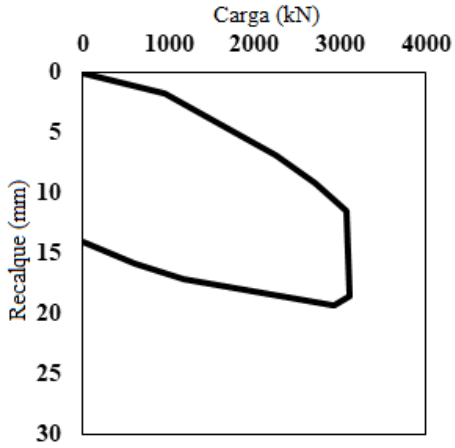


Figura 2. Dados do CPT – qc e fs.

3.3 Prova de Carga Estática

A prova de carga estática foi executada em conformidade com a ASTM D1143/D1143M – *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load*. O ensaio teve como objetivo avaliar o comportamento carga–recalque da fundação profunda ensaiada e fornecer subsídios para a verificação da capacidade de carga geotécnica. A figura 3 apresenta a curva carga versus recalque obtida no ensaio, bem

como uma tabela com resumo das caracteristicas da prova de carga. Vale destacar que foram obtidas de forma separadas as cargas resistidas pelo fuste e pela ponta da estaca ensaiada.



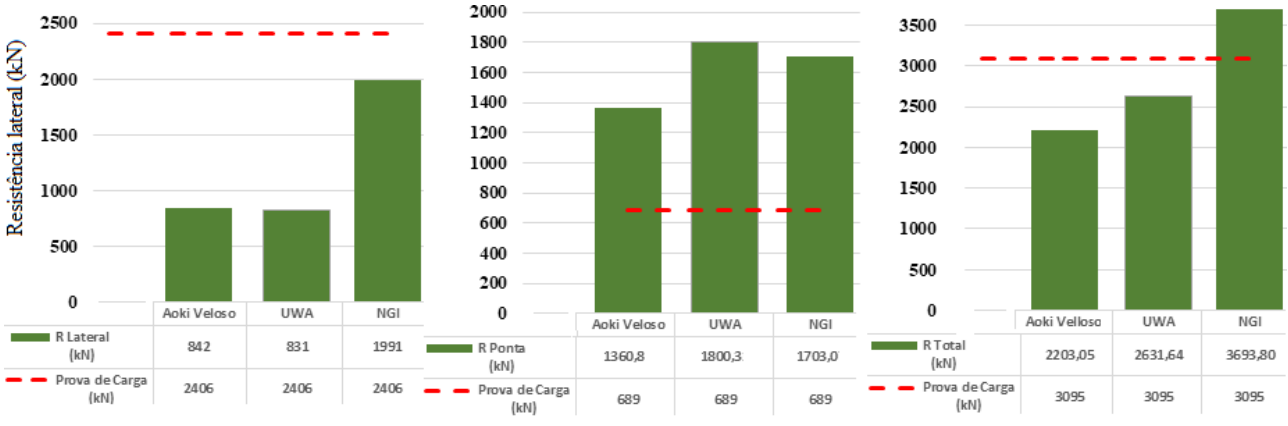
Detalhe	Descrição
Tipo de estaca/material	Estaca quadrada de concreto
Comprimento (m)	16,8
Largura externa (mm)	610
Método de instalação	Cravação
Tempo set up (dias)	12
Tipo de carregamento	Compressão
Qmax medido (kN)	3095
Qfuste (kN)	2046
Qponta (kN)	689

Figura 3. Dados da prova de carga.

4 PREVISÕES VERSUS DESEMPENHO

A seguir apresentam-se as previsões das capacidades de carga geotécnicas à compressão obtidas por cada metodologia semiempírica utilizada (Aoki e Velloso, 1975; UWA, 2005 e NGI, 2005) e o desempenho da prova de carga.

A figura 4a mostra a comparação entre previsão das três metodologias semiempíricas utilizadas e o desempenho da prova de carga para a capacidade de carga geotécnica à compressão do fuste da estaca de concreto estudada. A figura 4b mostra a mesma comparação a ponta da estaca, já a figura 4c mostra a comparação para a capacidade de carga total da estaca.



(a) capacidade de carga lateral da estaca (b) capacidade de carga da ponta da estaca (c) capacidade de carga total da estaca

Figura 4. Previsão vs desempenho da capacidade de carga da estaca: (a) Fuste; (b) Ponta e (c) Total.

A capacidade de carga desempenhada pelo fuste da estaca na prova de carga estática foi superior as três previsões pelos métodos semiempíricos empregados. O método do NGI (2005) foi o que previu uma capacidade de carga mais próximo do desempenho real da estaca ensaiada, sendo cerca de 20% menor. Os métodos de Aoki e Velloso (1975) e UWA (2005) previram valores semelhantes entre eles, mas bem menores que o desempenho real do fuste da estaca (cerca de 65% menor).

A capacidade de carga real na ponta da estaca na prova de carga estática foi inferior as três previsões pelos métodos semiempíricos empregados. O método do Aoki e Velloso (1975) foi o que previu a menor

capacidade de carga, mesmo assim quase o dobro do desempenho da estaca ensaiada. Já os métodos da UWA (2005) e NGI (2005) previram valores quase três vezes maiores que a prova de carga da estaca.

Com relação a capacidade de carga total da estaca, quando comparado ao desempenho da prova de carga, os métodos de Aoki e Velloso (1975) e UWA (2005) subestimaram o valor (cerca de 30% e 15%, respectivamente), enquanto o método do NGI (2005) superestimou a carga de ruptura geotécnica em cerca de 20%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A utilização do ensaio de cone elétrico em projetos de fundações *offshore* promove alguns benefícios quando comparado a sondagem com medida de N_{SPT}, uma vez que o resultado depende menos do operador, trazendo uma repetibilidade maior. As metodologias de estimativa de parâmetros geotécnicos e de capacidade de carga de fundações possuem uma validação internacional, visto que o ensaio é tipicamente executado de forma muito parecida ao redor do mundo.

Neste contexto, foram comparados as estimativas de capacidade de carga a compressão pelos métodos semiempíricos de Aoki e Velloso (1975), UWA (2005) e NGI (2005) com o desempenho de uma prova de carga de uma estaca em ambiente *offshore*. A estaca, de concreto – lado de 60 cm e comprimento enterrado de 16,8 m – foi instrumentada no fuste e na ponta, possibilitando as comparações das capacidades de carga de três maneiras distintas: (i) lateral; (ii) ponta e (iii) total.

As estimativas das capacidades de carga lateral, quando comparadas com o desempenho da estaca na prova de carga não apresentaram convergência para o valor medido. De uma forma geral os três valores foram subestimados em relação ao obtido na instrumentação, sendo o método do NGI (2005) o que mais se aproximou.

De forma contrária, todas as três estimativas das capacidades de carga da ponta da estaca superestimaram os valores, quando comparados a carga de ruptura medida na ponta da estaca. Vale destacar, que nos métodos da UWA (2005) e NGI (2005) foi considerada a hipótese de ponta da estaca embuchada.

Por fim, associada a capacidade de carga total estimada pelas três metodologias, pode-se concluir que em relação ao desempenho da prova de carga estática na estaca: (i) Aoki e Velloso (1975) forneceu um resultado a favor da segurança; (ii) UWA (2005) também forneceu um resultado a favor da segurança e (iii) NGI (2005) forneceu um resultado contra a segurança.

Acredita-se que associado ao método de Aoki e Velloso (1975), as diferenças entre previsão e desempenho podem estar associadas a natureza do banco de dados original do método - provas de carga em estaca *onshore* – e o tipo de cone utilizado por aqueles autores – cone mecânico.

Sobre as diferenças obtidas nas estimativas dos métodos UWA (2005) e NGI (2005) e o desempenho da estaca, acredita-se que a discrepância, sobretudo na estimativa da capacidade de carga da ponta, pode estar associada ao fenômeno do embuchamento. Esse comportamento observado reforça a possível sensibilidade das previsões de capacidade de carga de ponta às hipóteses adotadas quanto ao embuchamento, especialmente em estacas cravadas em ambiente *offshore* com solos arenosos finos e presença de silte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API (1993). *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms – working stress design (API RP 2A-WSD).* American Petroleum Institute, Washington, D.C.

ASTM International (2020). ASTM D5778 – Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils.

ASTM International (2013). ASTM D1143/D1143M – Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load.

Aoki, N., Velloso, D. A. (1975). An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: *5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires. Anais... p. 367–376.

Clausen, C. J. F., Aas, P., Karlsrud, K. (2005). Bearing capacity of driven piles in sand from CPT data. In: *International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth. Anais... p. 41–48.

Karlsrud, K., Clausen, C. J. F., Aas, P. (2005). Axial capacity of driven piles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v. 131, n. 9, p. 1095–1108.

Lehane, B. M., Schneider, J. A., Xu, X. (2005). A review of design methods for driven piles in sand. *Géotechnique*, v. 55, n. 9, p. 633–644.

Lehane, B. M., et al. (2013). Cone penetration test-based pile design for driven piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 50, n. 8, p. 1–15.

NGI (2005). Bearing capacity of driven piles in sand – the NGI approach. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.

UWA (2005). CPT-based pile design methods for driven piles in sand. University of Western Australia, Crawley.

Oliveira, J. F. (2025). *Métodos de capacidade de carga geotécnica à ruptura de estacas baseados no ensaio de cone (CPT).* Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé.