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/COBRAMSEG2026.5/83

Modelagem Probabilística da Resistência Dinâmica de Estacas: Avaliação da Segurança Estrutural em Empreendimento Industrial

Fernando Pinheiro Weber
Eng. De Projetos, Vibra Energia S/A, UFSC, Porto Alegre, Brasil, fp_weber@yahoo.com.br

Jose Manuel Guerra Colque
Eng. Civil, UPSA, Florianópolis/SC, Brasil, jose.manuel.guerra.colque@gmail.com

João Guilherme Quevedo dos Santos
Estudante, UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, joaoggs@gmail.com

Gracieli Dienstmann
Prof. Dra, pesquisadora, UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, g.dienstmann@ufsc.br

RESUMO: estimativa da capacidade de carga de estacas é tradicionalmente realizada por métodos determinísticos baseados em parâmetros geotécnicos obtidos em investigações de campo. Entretanto, a variabilidade natural dos solos e as incertezas associadas aos modelos de cálculo podem resultar em diferenças entre a resistência estimada em projeto e o comportamento observado em campo. Neste trabalho é apresentada uma análise probabilística da capacidade de carga de estacas raiz a partir de nove provas de carga dinâmica interpretadas pelo método CASE/CAPWAP em um empreendimento industrial localizado em Maceió/AL. Foram analisados os valores de resistência mobilizada obtidos nas nove provas de carga dinâmica e as solicitações atuantes no sistema de fundações, permitindo estimar o fator de segurança estatístico, a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade. Os resultados indicaram resistência média mobilizada da ordem de 42,3 tf. A análise probabilística mostrou que a variabilidade observada nos resultados das provas de carga influencia significativamente o nível de confiabilidade do sistema, permitindo estimar cargas de trabalho compatíveis com níveis de segurança típicos de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga Dinâmica, Fator de segurança, Probabilidade de falha

ABSTRACT: The estimation of pile bearing capacity is traditionally performed using deterministic methods based on geotechnical parameters obtained from field investigations. However, the natural variability of soils and the uncertainties associated with calculation models may result in differences between the design resistance and the behavior observed in the field. This study presents a probabilistic analysis of the bearing capacity of root piles based on nine dynamic load tests interpreted using the CASE/CAPWAP method in an industrial project located in Maceió, Alagoas, Brazil. The mobilized resistance values obtained from the nine dynamic load tests and the loads acting on the foundation system were analyzed, allowing the estimation of the statistical factor of safety, probability of failure, and reliability index. The results indicated an average mobilized resistance of approximately 42.3 tf. The probabilistic analysis showed that the variability observed in the dynamic load test results significantly influences the reliability level of the system, allowing the estimation of allowable loads compatible with typical safety levels adopted in foundation design.
KEYWORDS: Dynamic load tests, Safe Factor, Probability of Failure.

1 INTRODUÇÃO

A estimativa da capacidade de carga de estacas é tradicionalmente realizada por métodos determinísticos baseados em parâmetros geotécnicos obtidos em investigações de campo. Entretanto, a variabilidade natural dos solos, especialmente em regiões de depósitos, e as incertezas associadas aos modelos de previsão podem resultar em diferenças entre a resistência estimada em projeto e o comportamento observado em campo. Nesse contexto, os ensaios de carregamento dinâmico em estacas, realizados com o uso do *Pile Driving Analyzer* (PDA), constituem uma ferramenta importante para avaliação da resistência mobilizada e da integridade

estrutural das estacas, sendo interpretados por métodos como CASE e CAPWAP. No empreendimento industrial analisado neste estudo, localizado em Maceió/AL (figura 1), foram executados ensaios dinâmicos em estacas raiz para avaliação da resistência mobilizada e do mecanismo de transferência de carga ao longo do fuste e da ponta. A partir desses resultados, foi realizada uma modelagem probabilística da resistência e das solicitações atuantes, permitindo estimar a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade do sistema de fundações. O objetivo é verificar qual a carga de ruptura adotar no projeto geotécnico para estimar reforço de fundações.



Figura 1. Mapa de localização da área de implantação dos tanques. Fonte: Relatório técnico Vibra Energia

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Entre os métodos de avaliação do desempenho de estacas em campo destacam-se os ensaios de carregamento dinâmico, amplamente utilizados devido à rapidez de execução e à possibilidade de avaliar tanto a capacidade de carga quanto a integridade estrutural das estacas. Esses ensaios baseiam-se na teoria da propagação de ondas unidimensionais em barras, na qual o impacto do martelo gera ondas de tensão que se propagam ao longo da estaca e são registradas por sensores de deformação e aceleração instalados próximos ao topo. (ABNT 13208:2007).

Entretanto, os perfis geotécnicos são caracterizados por elevada variabilidade das propriedades do solo e por incertezas associadas às metodologias de investigação e aos modelos de cálculo utilizados em projeto. Nesse contexto, abordagens probabilísticas têm sido progressivamente incorporadas à análise de fundações profundas com o objetivo de quantificar explicitamente essas incertezas. A análise de confiabilidade permite modelar a variabilidade das variáveis geotécnicas e avaliar o desempenho estrutural em termos probabilísticos, fornecendo medidas como a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade (Zhang et al., 2018).

Na análise de confiabilidade, o desempenho de um sistema geotécnico é descrito por meio de uma função de estado limite, que expressa a margem de segurança entre resistência e solicitação. De forma geral, essa função pode ser escrita como $g(x) = R - S$ em que R representa a resistência disponível do sistema e S a solicitação atuante. A condição de falha ocorre quando $g(X) \leq 0$, ou seja, quando a solicitação excede a resistência. A probabilidade de falha corresponde à probabilidade de ocorrência dessa condição e pode ser obtida por integração das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas (Ang & Tang, 1984; Cao *et al.,* 2023).

A relação entre a probabilidade de falha e o nível de segurança do sistema pode ser expressa por meio do índice de confiabilidade β, que representa a distância, no espaço normalizado das variáveis aleatórias, entre o ponto médio do sistema e o estado limite de falha. Valores mais elevados de β indicam menores probabilidades de falha e, consequentemente, maior confiabilidade estrutural. (IVANDIK, K. *et al*. 2022)

De acordo com Cao *et al*. (2023), Aoki (2002) diversos métodos probabilísticos podem ser utilizados para estimar o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha em problemas geotécnicos. Entre os mais utilizados destacam-se o *First Order Second Moment* (FOSM), simulações de Monte Carlo (MC).

No contexto de fundações profundas, Aoki (2002) destaca que a modelagem probabilística da resistência das estacas e das solicitações atuantes permite avaliar de forma mais realista o nível de segurança do sistema,

uma vez que o fator de segurança determinístico não representa diretamente a probabilidade de falha associada ao projeto.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A investigação geotécnica do empreendimento foi realizada por meio de sondagens de simples reconhecimento à percussão (SPT) complementadas por ensaios geofísicos utilizados para auxiliar na interpretação da estratigrafia local. Os resultados indicaram um perfil de solo heterogêneo, caracterizado predominantemente por depósitos sedimentares com variação de resistência ao longo da profundidade.

As sondagens revelam uma camada entre 3m e 6m aproximadamente de material rochoso, sendo necessário a realização de sondagem rotativa e complementarmente ensaios de geofísica. A figura 2 resume os boletins de sondagem.

Prof. (m)	SONDAGENS					
	SM-01		SM-02		SM-03	
	Nspt	Material	Nspt	Material	Nspt	Material
1	0	Aterro	0	Aterro	0	Aterro
2	0	Argila pouco siltosa	0	Argila pouco siltosa	0	Argila pouco siltosa
3	0	Argila pouco siltosa	0	Argila pouco siltosa	0	Argila pouco siltosa
4	0	Argila pouco siltosa	0	Argila pouco siltosa	0	Granito
5	0	Granito	0	Argila pouco siltosa	0	Granito
6	0	Granito	0	Areia grossa c/matacão	0	Granito
7	8	Areia média	0	Areia grossa c/matacão	3	Granito
8	4	Areia média	3	Areia grossa c/matacão	3	Areia fina
9	2	Areia média	9	Areia grossa pouco siltosa	4	Areia fina
10	3	Areia média	10	Areia grossa pouco siltosa	5	Areia fina
11	2	Areia média	12	Areia grossa pouco siltosa	8	Areia fina
12	2	Area fina-média	15	Areia grossa pouco siltosa	10	Areia fina
13	4	Area fina-média	23	Areia grossa pouco siltosa	11	Areia fina
14	6	Area fina-média	10	Areia grossa pouco siltosa	14	Areia fina
15	23	Areia fina	8	Areia fina	14	Areia fina
16	34/15	Areia fina	22	Areia fina	15	Areia fina
17	35/15	Areia fina	34	Areia fina	24	Areia fina-média

Figura 2. Resumo das sondagens. Fonte: Relatório Técnico Vibra Energia, 2025

Pelas sondagens identifica-se que logo após a camada argilosa de baixa competência identifica-se uma camada composta por areia grossa e presença de fragmentos de rocha com espessura média de 3,0m. Este fato resulta em alta heterogeneidade do substrato como um todo, dificultando o cálculo e a execução de fundações com métodos convencionais. A partir de 15m de profundidade o terreno passa a ter Nspt crescente, indicando uma condição geotécnica mais favorável para a execução das fundações.

A tomografia elétrica (tomografia de resistividade elétrica) elabora imagens do subsolo e neste caso confirma as condições previamente conhecidas nas sondagens. A figura 3 exemplifica uma seção geoelétrica obtida ao longo da linha A1L2. A linha tracejada indica o provável contato entre a camada superior de maior condutividade com a camada de maior resistividade abaixo. Comparativamente ao SPT indica-se uma camada superficial de material inconsolidado. A partir da linha tracejada a tendência é de material consolidado.

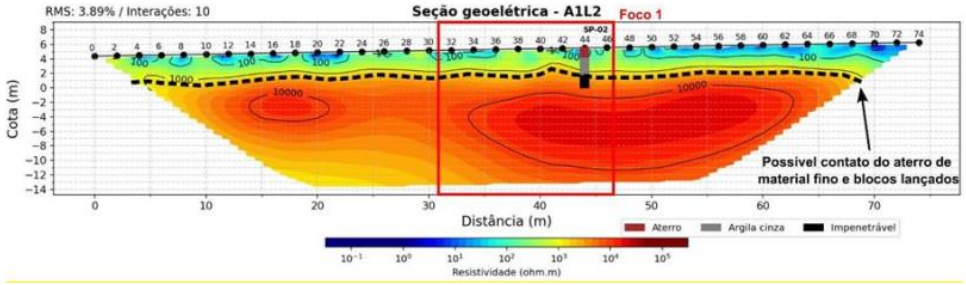


Figura 3. Exemplo seção geoelétrica interpretada. Fonte: Relatório Técnico Vibra Energia 2025

4 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

O estudo foi desenvolvido em um empreendimento industrial localizado em Maceió/AL, referente à implantação da fundação de um tanque vertical de armazenamento de produtos combustíveis. A solução de fundação adotada consistiu em um sistema de fundações profundas executadas por estacas do tipo raiz, com revestimento metálico e preenchimento com argamassa.

As estacas possuem diâmetro nominal de 273 mm e espessura de parede de 9 mm, sendo executadas com tubo metálico preenchido com argamassa estrutural. Os comprimentos das estacas variaram de 15 m e 22 m, em função das condições geotécnicas encontradas no local. A carga admissível de projeto adotada para as estacas foi da ordem de 63 tf. A figura 4 mostra a distribuição das estacas conforme projeto estrutural.

5 METODOLOGIA

A análise de confiabilidade das fundações foi realizada por meio de uma abordagem probabilística baseada na modelagem estatística das variáveis de resistência e solicitação. Considerando a variabilidade inerente aos parâmetros geotécnicos e às condições de carregamento, as variáveis foram tratadas como variáveis aleatórias caracterizadas por suas distribuições de probabilidade, média e coeficiente de variação, neste trabalho foram trabalhados os resultados da resistência comparando-os com as solicitações de cálculo.

A segurança do sistema foi avaliada por meio de uma função de estado limite que representa a diferença entre a resistência mobilizada da estaca e a solicitação aplicada. A função de desempenho pode ser expressa conforme fórmula abaixo onde R representa a resistência da estaca obtida através dos ensaios de carregamento dinâmico e S a solicitação no elemento; $g(x)$ é a função do estado limite. A condição falha quando $g(x) \leq 0$

$$g(x) = R - S \tag{1}$$

A probabilidade de falha do sistema é definida pela fórmula 2 em que P_f representa a probabilidade de ocorrência do estado limite de falha. A quantificação desse risco é representada pelo índice de confiabilidade β, definido pela fórmula 3, onde ϕ representa a função de distribuição acumulada.

$$P_f = [P\big(g(x)\big) \leq 0] \tag{2}$$

$$\beta = -\emptyset^{-1}(P_f) \tag{3}$$

O tanque de armazenamento inicialmente foi calculado com uma distribuição de 25 estacas com carga de trabalho de 63 tf, figura 4. Do total de estacas em 9 foram realizados testes dinâmicos para verificação das premissas de projeto. A análise foi desenvolvida a partir de nove provas de carga dinâmica realizadas em estacas selecionadas da obra. Não se buscou caracterizar estatisticamente a variabilidade geotécnica do maciço,

mas sim avaliar a dispersão observada da resistência mobilizada das estacas executadas e sua influência na confiabilidade do sistema de fundações

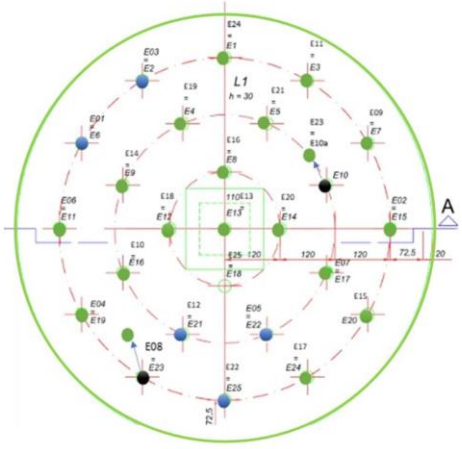


Figura 4. Distribuição das estacas na fundação. Fonte: Relatório Técnico Vibra Energia, 2025

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 estão descritos valores de resistência medidos nos ensaios e os valores de solicitação do projeto estrutural, com esses dados primeiramente foram definidos a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação da resistência e da solicitação conforme tabela 2.

Tabela 1 – Solicitação e Resistência das estacas ensaiadas

Estaca	Resistência (tf)	Solicitação(tf)
E02	45.0	44.5
E05	30.3	6.15
E06	41.5	5.58
E07	51.7	22.0
E10A	59.2	55.7
E14	22.2	17.4
E15	54.8	35.0
E17	38.5	35.5
E21	37.5	28.3

Tabela 2 – Estatística Descritiva das resistências e solicitações

Variável	Média	Desv. Pad	COV	Número de ensaios
Resistência	42,30 tf	11,85 tf	0,28	9
Solicitação	27,74 tf	15,87 tf	0,57	N/A

Tabela 3 – Ajuste de distribuições das resistências e solicitçaões

Variável	Distribuição	KS
Resistência	Normal	0,1332
	Lognormal	0,1680
	Weibull	0,1290
Solicitação	Normal	0,1354
	Lognormal	0,1865
	Weibull	0,1659

A estatística descritiva dos resultados de resistência mobilizada indicou média amostral de 42,30 tf e desvio padrão de 11,85 tf, correspondendo a coeficiente de variação de aproximadamente 28%. Em seguida, foram ajustadas as distribuições Normal, Lognormal e Weibull aos dados experimentais. Os parâmetros ajustados foram obtidos por máxima verossimilhança, resultando em $\sigma = 11{,}17\text{tf}$ para a distribuição Normal, $\mu_{\ln} = 3{,}71\text{e}\ \ \sigma_{\ln} = 0{,}29$ para a Lognormal, e $k = 4{,}39\text{e}\ \ \lambda = 46{,}53\text{tf}$ para a Weibull. Entre os modelos testados, as distribuições apresentaram resultados similares comparativamente, especialmente devido ao número de amostras (provas de carga). Observa-se comportamento assimétrico dos dados, com presença de valores reduzidos e cauda superior pronunciada, sendo mais adequadamente representado pelas distribuições Lognormal e Weibull. Em contraste, as resistências apresentaram comportamento mais concentrado, com menor assimetria, resultando em excelente ajuste para todas as distribuições testadas conforme figuras 5 e 6.

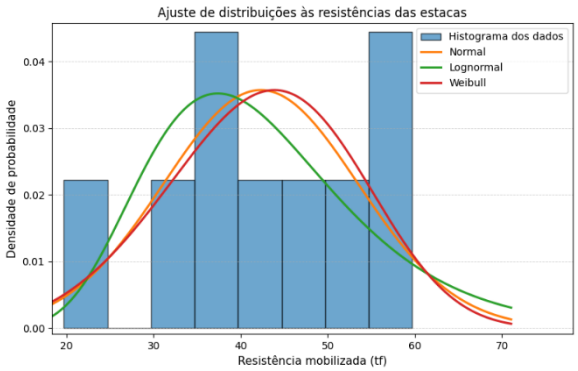


Figura 5 – Distribuição das resistências. Fonte: O autor 2026

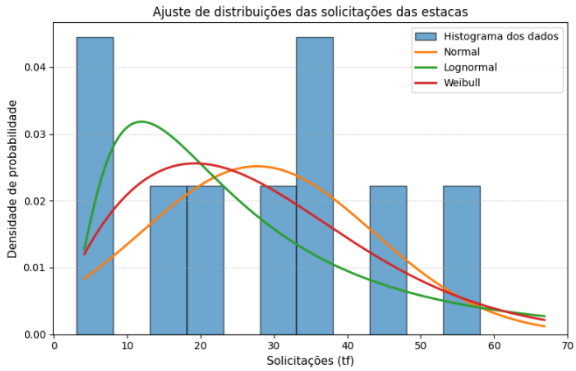


Figura 6 – Distribuição das solicitações. Fonte: O autor 2026

A simulação de Monte Carlo considerou explicitamente as distribuições ajustadas às variáveis resistência e solicitação. Os resultados indicaram variações nos índices de confiabilidade entre os diferentes modelos probabilísticos, com valores de β variando entre aproximadamente 0,74 e 0,78, e probabilidades de falha entre 21,7% e 23,0%, conforme figuras 7 e 8.

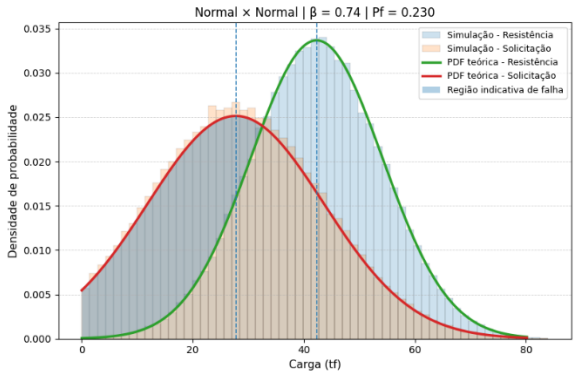


Figura 7 – Ajuste das distribuições probabilística de resistência e solicitação com indicação da região de falha com distribuição normal. Fonte: O autor 2026

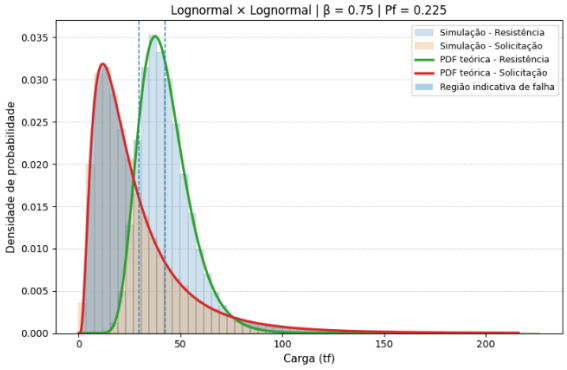


Figura 8 – Ajuste das distribuições probabilística de resistência e solicitação com indicação da região de falha com distribuição lognormal. Fonte: O autor 2026

7 CONCLUSÃO

A análise probabilística realizada a partir de nove provas de carga dinâmica interpretadas pelo método CASE/CAPWAP permitiu avaliar a influência da variabilidade observada nas resistências mobilizadas das estacas sobre a confiabilidade do sistema de fundações. Os resultados indicaram coeficiente de variação de 28% para a resistência, evidenciando dispersão significativa dos valores obtidos em campo e reforçando a importância da consideração explícita das incertezas associadas ao desempenho das fundações. A comparação entre as distribuições de resistência e solicitação mostrou que a condição atual de carregamento apresenta índice de confiabilidade de $\beta = 0{,}75$, associado a uma probabilidade de falha próxima de 22%, indicando níveis de segurança inferiores as diretrizes normativas em projetos geotécnicos. Aplicando os conceitos de confiabilidade utilizados Aoki (2002), verificou-se a necessidade da redução da carga de trabalho do projeto em estudo, sendo estimada uma carga admissível da ordem de 18,6 tf para um índice de confiabilidade próximo de $\beta = 2{,}0$. Tendo em vista não ser o fator ideal conforme alguns autores, recomenda-se prova de carga estática nas fundações, com o objetivo de reduzir a variabilidade apresentada. Os resultados demonstram que a utilização de abordagens probabilísticas associadas a resultados de provas de carga representa uma ferramenta complementar aos métodos determinísticos tradicionais, permitindo incorporar a variabilidade observada em campo na avaliação da segurança e na definição de cargas de projeto para fundações profundas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). NBR 13208. *Estacas- Ensaio de carregamento dinâmico*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.

Ang, A.H.-S., Tang, W.H. (1984). Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Volume II – Decision, Risk, and Reliability. John Wiley & Sons, New York, USA.

AOKI, N. (2002) Novo conceito de carga admissível de fundação profunda baseado em probabilidade de ruína. III Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, GEOSUL, ABMS, Joinville/SC, p. 131-139.

AOKI, N., Cintra, J. C. A., e Menegotto, M. L. (2002). Probabilidade de ruína como critério para definir o coeficiente de segurança a ser usado na previsão da carga admissível de fundações por estacas. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica , ABMS, São Paulo/SP

Baecher, G.B., Christian, J.T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Cao Z. , Xiao T., Ji J. Zeng P., (2023). *Geotechnical Reliability Analysis*. Springer, Tongj University Press.

Ivandik, K.; Dodigovic,F.; Soldo, B.; Kovačević, M. S. (2022) *Probabilistic Evaluations of Prescribed Safety Margins in Eurocode 7 for Spread Foundations*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 66(3), pp. 710–719.

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H. (1999a). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 36, n. 4, p. 612–624.

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H. (1999b). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 36, n. 4, p. 625–639.