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/COBRAMSEG2026.5/8

Análise de Confiabilidade de Estaqueamento Metálico em Obra Industrial: Comparação entre Ensaios PDA e Método Décourt-Quaresma

Pedro Augusto Silva Oliveira
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, pedro.soliveira@agnet.com.br

Lucas Ribeiro Silva
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, lucas.silva@agnet.com.br

Marco Aurelio Abreu Peixoto da Silva
Engenheiro Civil, M.Sc., CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, marco.peixoto@agnet.com.br

Matheus Bernini Cecere
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, matheus.bernini@agnet.com.br

RESUMO: A análise de confiabilidade aplicada a fundações profundas representa um avanço complementar às abordagens determinísticas tradicionais que utilizam fatores globais de segurança fixos. Essa abordagem permite quantificar explicitamente a probabilidade de falha e o nível de segurança das fundações, considerando a variabilidade das capacidades de carga e contribuindo para decisões de projeto mais racionais e economicamente consistentes. Neste trabalho, apresenta-se uma análise de confiabilidade aplicada a um estaqueamento metálico de grande porte composto por 277 estacas submetidas a uma carga de trabalho de 1.600 kN por estaca, em uma obra industrial localizada no litoral do Sudeste brasileiro, em região de planície costeira próxima ao delta de um rio. A avaliação da confiabilidade considerou dois conjuntos de dados: resultados de 12 ensaios de carregamento dinâmico (PDA) e capacidades de carga estimadas pelo método semiempírico de Décourt-Quaresma a partir de 14 sondagens SPT. As capacidades de carga foram tratadas como variáveis aleatórias e a análise probabilística baseou-se na função de estado-limite g = R – S. As análises foram conduzidas pelos métodos FORM e FOSM, permitindo estimar o índice de confiabilidade (β) e a probabilidade de falha (Pf).

PALAVRAS-CHAVE: Confiabilidade, FORM, FOSM, Ensaio de Carregamento Dinâmico (PDA); Estacas.

ABSTRACT: Reliability analysis applied to deep foundations represents an advancement complementary to traditional deterministic approaches that rely on fixed global safety factors. This approach allows the explicit quantification of the probability of failure and the level of safety associated with foundations, considering the variability of load-bearing capacities and contributing to more rational and economically consistent design decisions. In this study, a reliability analysis is presented for a large-scale steel pile foundation system composed of 277 piles subjected to a working load of 1.600 kN per pile, in an industrial project located on the southeastern coast of Brazil, in a coastal plain region near a river delta. The reliability assessment considered two datasets: results from 12 dynamic load tests (PDA) and load-bearing capacities estimated using the semi-empirical Décourt–Quaresma method based on 14 standard penetration tests (SPT). The load-bearing capacities were treated as random variables, and the probabilistic analysis was based on the limit-state function g = R – S. The analyses were conducted using the FORM and FOSM methods, allowing the estimation of the reliability index (β) and the probability of failure (Pf).

KEYWORDS: Reliability Analysis; FORM; FOSM; Dynamic Load Testing (PDA); Piles.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de fundações profundas no Brasil é tradicionalmente realizado por abordagens determinísticas baseadas em fatores globais de segurança. Essas metodologias, embora consolidadas, não permitem quantificar explicitamente as incertezas associadas às propriedades do solo, aos métodos de previsão de resistência e às condições de execução. A análise de confiabilidade surge como ferramenta complementar ao dimensionamento determinístico, permitindo expressar o desempenho geotécnico em termos de probabilidade de falha e índice de confiabilidade. Essa abordagem possibilita avaliar de forma racional o risco envolvido, incorporando explicitamente a variabilidade das variáveis do problema.

No contexto das fundações profundas, a confiabilidade pode ser avaliada a partir de diferentes fontes de informação, como métodos semiempíricos baseados em ensaios de campo e resultados de ensaios instrumentados. Entre os métodos semiempíricos, destaca-se o método de Décourt-Quaresma, amplamente empregado no Brasil a partir de resultados de sondagens SPT. Por outro lado, os ensaios de carregamento dinâmico constituem uma ferramenta de controle de campo capaz de fornecer estimativas diretas da capacidade de carga das estacas. Neste trabalho, é realizada uma análise de confiabilidade aplicada a um estaqueamento de grande porte executado em uma obra industrial, comparando-se os resultados obtidos a partir de ensaios de carregamento dinâmico com aqueles estimados pelo método de Décourt-Quaresma. A confiabilidade é avaliada por meio dos métodos probabilísticos de primeira ordem FOSM e FORM, permitindo discutir a influência da caracterização probabilística da resistência nos níveis de segurança obtidos.

2 METODOLOGIA

A metodologia baseia-se na comparação entre dois conjuntos de estimativas de capacidade de carga das estacas e na aplicação de métodos de confiabilidade de primeira ordem. A função de estado-limite é definida por:

$$g = R - S \tag{1}$$

onde R é a resistência da estaca e S a solicitação de projeto.

2.1 Local de estudo

O estudo refere-se a uma obra industrial na costa do Sudeste brasileiro, em planície costeira próxima ao delta de um rio. O empreendimento é fundado sobre 277 estacas metálicas HP 310x79, com comprimento médio de 39 m. O subsolo é composto por depósitos sedimentares recentes associados a processos costeiros e fluviais, sendo as estacas cravadas até camadas mais competentes.

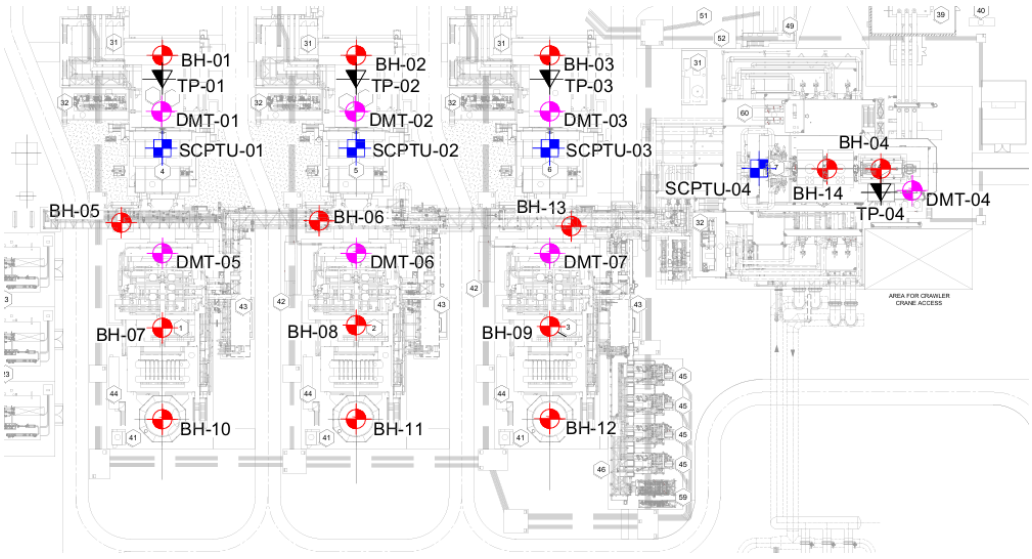


Figura 1. Locação das sondagens na obra industrial.

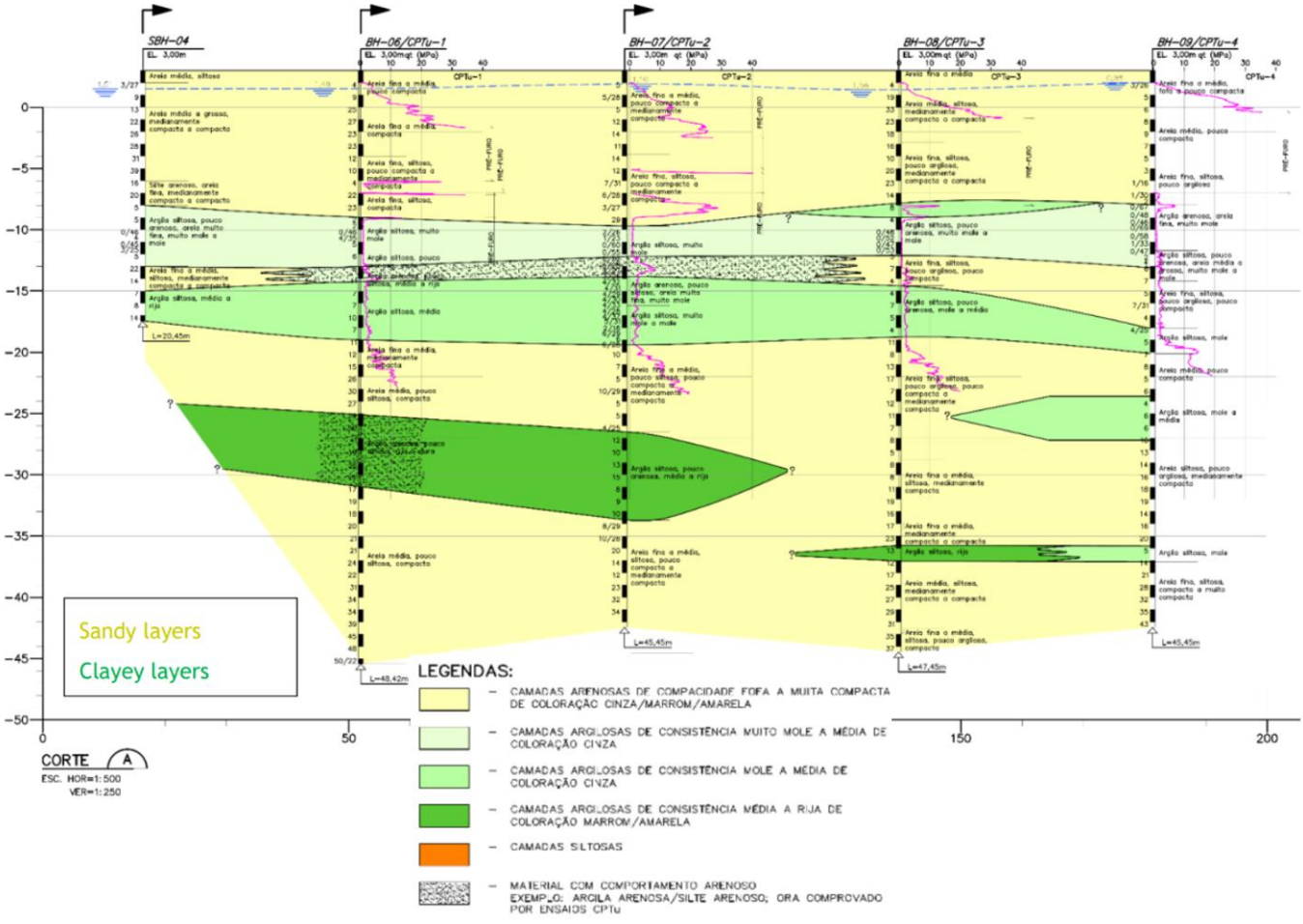


Figura 2. Perfil geotécnico.

2.2 Método Décourt-Quaresma

O método Décourt-Quaresma estima a capacidade de carga axial a partir de correlações com o índice N_{SPT}, decompondo a resistência última em ponta (Qp) e atrito lateral (Qs), que são calculadas em função das tensões unitárias, obtidas por correlações empíricas do tipo:

$$q_p = Cp \,.\, \alpha \,.\, N_{spt} \tag{2}$$

$$f_s = \beta \,.\, N_{spt} \tag{3}$$

Para estacas metálicas, $\alpha = \beta = 1$, sendo $C_p$dependente do tipo de solo (120 kN/m² para argila, 200 kN/m² para silte argiloso, 250 kN/m² para silte arenoso e 400 kN/m² para areia). No presente estudo, as capacidades de carga estimadas pelo método de Décourt-Quaresma foram obtidas a partir de 14 sondagens SPT, sendo os valores resultantes tratados como realizações de uma variável aleatória representativa da resistência das estacas. As capacidades de carga calculadas variam entre 2.135 kN e 3.655 kN.

Tabela 1. Capacidades de carga calculadas.

SPT	Carga de ruptura calculada por Décourt-Quaresma [kN]
SP01	3.652
SP02	3.337
SP03	2.634
SP04	2.876
SP05	3.575
SP06	2.970
SP07	3.252
SP08	3.267
SP09	3.578
SP10	2.722
SP11	3.655
SP12	2.714
SP13	2.860
SP14	2.135

2.3 Ensaio de carregamento dinâmico (PDA)

O ensaio de carregamento dinâmico em estacas, comumente denominado ensaio PDA (*Pile Driving Analyzer*), baseia-se na teoria da propagação unidimensional de ondas em barras elásticas, originalmente desenvolvida por Smith (1960) e posteriormente aprimorada por diversos autores. Inicialmente, a capacidade de carga pode ser avaliada por métodos simplificados, como o método *CASE*, que fornece estimativas rápidas da resistência total. No entanto, para uma análise mais refinada, especialmente em estacas de grande comprimento e em solos estratificados, é empregada a análise *CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program)*.

A análise *CAPWAP* consiste em um procedimento de ajuste iterativo entre os sinais medidos em campo e os sinais calculados por um modelo numérico de propagação de ondas. Nesse processo, são ajustados parâmetros como a distribuição do atrito lateral, a resistência de ponta, o amortecimento do solo e as características do contato estaca–solo, até que se obtenha uma boa concordância entre os registros medidos e simulados. O resultado da análise *CAPWAP* fornece estimativas detalhadas da capacidade de carga estática equivalente da estaca, bem como da parcela de resistência mobilizada ao longo do fuste e na ponta.

Os ensaios PDA foram realizados em 12 estacas metálicas tipo HP 310x79, executadas após o período de cicatrização (*set-up*) do solo, a fim de obter estimativas mais representativa de resistência de longo prazo. As capacidades obtidas variaram entre 2.540 kN e 4.000 kN, conforme compiladas na tabela abaixo:

ENSAIO	Carga de ruptura [kN]
PDA01	2.543
PDA02	3.633
PDA03	3.626
PDA04	2.552
PDA05	3.259
PDA06	2.540
PDA07	4.000
PDA08	2.900
PDA09	3.348
PDA10	3.548
PDA11	3.747
PDA12	3.205

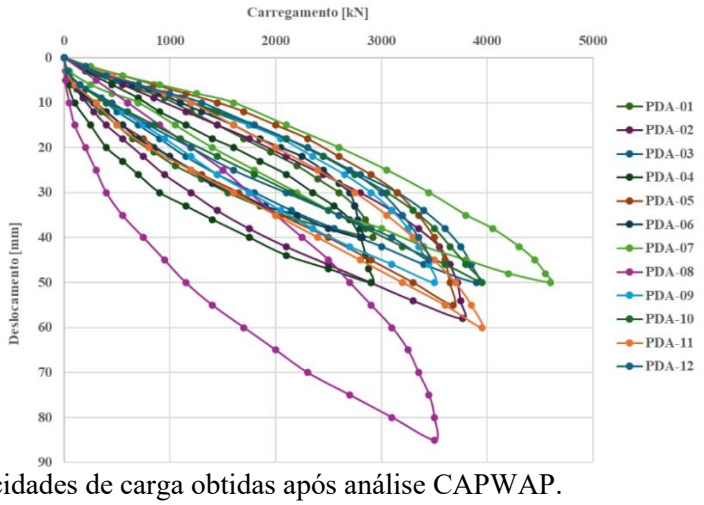


Figura 3. Capacidades de carga obtidas após análise CAPWAP.

2.4 Caracterização estatística da resistência

Foram calculados de forma amostral os parâmetros estatísticos básicos - média, desvio padrão e coeficiente de variação - a partir das amostras disponíveis (12 valores para os ensaios PDA e 14 valores para o método de Décourt-Quaresma). Em seguida, procedeu-se à avaliação da forma das distribuições por meio do cálculo dos coeficientes de assimetria (*skewness*) e de planicidade (*kurtosis*), com o objetivo de verificar a adequação da hipótese de distribuição normal e identificar possíveis desvios desse comportamento. A seguir, apresenta-se um resumo das médias, desvios padrão e coeficientes de variação (COV) obtidos para as duas fontes de dados:

Tabela 2. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação da variável resistência.

MÉTODOS	n	μR (kN)	σR (kN)	COV
ECD (PDA)	12	3.242	516	0,16
Décourt-Quaresma	14	3.088	459	0,15

Esses resultados indicam que tanto os ensaios de carregamento dinâmico quanto o método de Décourt-Quaresma fornecem estimativas de capacidade de carga com variabilidade semelhante, embora ligeiramente maior para os ensaios PDA, conforme evidenciado pelo coeficiente de variação. Os coeficientes de assimetria e planicidade foram calculados no *Microsoft Excel* utilizando estimadores amostrais. A assimetria (*skewness)* foi calculada a partir do estimador amostral corrigido, equivalente à função *ASSIMETRIA* do *Excel*, por meio de expressão baseada nos momentos centrais de terceira ordem. Essa abordagem assegura a correção para o tamanho das amostras analisadas. A planicidade (*kurtosis*) foi obtida diretamente por meio da função *CURT*, que fornece o excesso de planicidade em relação à distribuição normal. Os valores obtidos estão apresentados a seguir:

Tabela 3. Coeficientes de assimetria e planicidade.

MÉTODOS	*Skewness*	*Kurtosis*
ECD (PDA)	-0,29	-1,21
Décourt-Quaresma	-0,43	-0,44

Os coeficientes de assimetria obtidos situam-se no intervalo entre −0,5 e +0,5, indicando distribuições aproximadamente simétricas para ambos os conjuntos de dados. Por outro lado, os valores negativos de planicidade, especialmente no caso dos ensaios PDA, indicam distribuições mais achatadas que a normal, com menor concentração de valores em torno da média e caudas menos pronunciadas.

Esses resultados evidenciam que as distribuições das capacidades de carga não seguem rigorosamente o comportamento normal, sobretudo no que se refere à planicidade. Considerando ainda o tamanho das amostras e a natureza física da variável resistência - que é estritamente positiva e resultante de processos geotécnicos complexos - conclui-se que a hipótese de normalidade deve ser adotada com cautela. Assim, embora a aproximação normal seja aceitável para análises preliminares, a aplicação de métodos de confiabilidade capazes de tratar distribuições não normais, como o FORM, pode-se mostrar mais adequada para uma avaliação mais realista do desempenho do estaqueamento.

2.5 FOSM

O método FOSM (*First Order Second Moment*) é uma das abordagens probabilísticas mais tradicionais para a avaliação da confiabilidade estrutural e geotécnica. O método baseia-se na aproximação da função de estado-limite por uma expansão de Taylor de primeira ordem em torno dos valores médios das variáveis aleatórias, utilizando apenas os dois primeiros momentos estatísticos (média e variância).

Para variáveis independentes o índice de confiabilidade é então definido como:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \tag{4}$$

A função de estado-limite adotada é linear, $g = R - S$, e a solicitação S é considerada determinística. Nessas condições, o índice de confiabilidade pelo método FOSM assume a forma simplificada:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{5}$$

Portanto:

$$\beta_{FOSM} = \frac{\mu_R - S}{\sigma_R} \tag{6}$$

Embora o método FOSM seja matematicamente simples e de fácil implementação, sua aplicação apresenta limitações quando as variáveis aleatórias não seguem distribuição normal ou quando a função de estado-limite apresenta comportamento não linear. Em particular, quando a resistência é melhor representada por uma distribuição lognormal — situação comum em problemas geotécnicos — o FOSM pode fornecer estimativas conservadoras do índice de confiabilidade, uma vez que a aproximação por momentos não captura adequadamente a assimetria da distribuição.

2.6 FORM

O método FORM (First Order Reliability Method) constitui uma formulação mais geral e rigorosa para a análise de confiabilidade, sendo amplamente empregado em estudos de engenharia estrutural e geotécnica. Diferentemente do FOSM, o FORM não lineariza a função de estado-limite no ponto médio, mas sim no ponto de falha mais provável, também denominado ponto de projeto.

O procedimento do FORM inicia-se com a transformação das variáveis aleatórias do espaço original X para o espaço normal padrão U, no qual todas as variáveis apresentam distribuição normal padrão, com média zero e desvio padrão unitário. Para variáveis originalmente normais, essa transformação é direta. No caso de variáveis não normais, como a lognormal, são utilizadas transformações apropriadas, como o modelo de Nataf. Uma variável lognormal R, por exemplo, pode ser transformada para uma variável normal $Y = \ln(R)$, com parâmetros dados por:

$$\sigma_{lnR}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{lnR}^2}{\mu_R^2}\right) \tag{7}$$

$$\mu_{lnR} = \ln(\mu_R) - \frac{1}{2}\sigma_{lnR}^2 \tag{8}$$

No espaço normal padrão, o índice de confiabilidade β é definido como a menor distância entre a origem e a superfície de falha g(U)=0, sendo obtido pela solução de um problema de otimização. Para funções de estado-limite simples, como g = R – S com solicitação determinística, o cálculo do índice de confiabilidade pode ser expresso de forma analítica:

$$\beta_{FOSM} = \frac{\mu_{lnR} - \ln(S)}{\sigma_{lnR}} \tag{9}$$

quando a resistência é modelada como lognormal.

Uma característica importante do FORM é que, para funções de estado-limite lineares e variáveis normais, os resultados obtidos coincidem com aqueles fornecidos pelo método FOSM. Entretanto, quando ao menos uma das variáveis segue distribuição não normal, como no caso da resistência lognormal, os dois métodos deixam de ser equivalentes, mesmo que a função de estado-limite permaneça linear. Nessas situações, o FORM fornece uma estimativa mais consistente do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha.

No presente estudo, o método FORM é empregado como referência para a avaliação da confiabilidade, uma vez que permite incorporar de forma mais adequada a assimetria observada nas distribuições de resistência obtidas tanto pelos ensaios de carregamento dinâmico quanto pelo método de Décourt-Quaresma.

3 RESULTADOS

A caracterização estatística das capacidades de carga obtidas pelos ensaios de carregamento dinâmico (ECD) e pelo método semiempírico de Décourt-Quaresma indicou médias e coeficientes de variação da mesma ordem de grandeza, compatíveis com valores usuais reportados na literatura para fundações profundas. As capacidades obtidas por ECD apresentaram média ligeiramente superior, enquanto o método de Décourt-Quaresma apresentou menor dispersão relativa.

A aplicação do método FOSM, assumindo a resistência como variável normal, resultou em índices de confiabilidade β da ordem de 3,2 para ambos os conjuntos de dados, indicando níveis de segurança semelhantes sob essa hipótese. Já a análise pelo método FORM, com a resistência modelada e assumida como variável lognormal, conduziu a valores de β significativamente superiores, da ordem de 4,4, evidenciando a influência da caracterização probabilística da resistência nos resultados da análise de confiabilidade.

A Tabela 4 apresenta um resumo comparativo dos parâmetros estatísticos e dos resultados das análises de confiabilidade obtidos para cada abordagem considerada.

Tabela 4. Compilado dos resultados.

MÉTODOS	**n**	**μR (kN)**	**σR (kN)**	**COV**	**β (FOSM)**	**Pf (FOSM)**	**β (FORM)**	**Pf (FORM)**
Décourt-Quaresma	14	3.088	459	0,15	3,24	$5{,}9\times10^{-4}$	4,37	$6{,}0\times10^{-6}$
ECD (PDA)	12	3.242	516	0,16	3,18	$7{,}4\times10^{-4}$	4,39	$5{,}6\times10^{-6}$

Observa-se que a diferença entre os índices de confiabilidade obtidos a partir dos ensaios de carregamento dinâmico e do método semiempírico de Décourt-Quaresma é pequena quando comparada ao efeito da hipótese probabilística adotada para a resistência. A modelagem lognormal, aplicada no método FORM, resulta em probabilidades de falha duas ordens de grandeza inferiores às obtidas pelo FOSM, mesmo com função de estado-limite linear.

4 CONCLUSÕES

A aplicação da análise de confiabilidade ao estaqueamento metálico estudado evidenciou o potencial dessa abordagem como complemento às metodologias determinísticas tradicionalmente empregadas no projeto de fundações profundas. A comparação entre as capacidades de carga obtidas por ensaios de carregamento dinâmico (PDA) e pelo método semiempírico de Décourt-Quaresma indicou que, quando caracterizadas estatisticamente, ambas conduzem a níveis de confiabilidade semelhantes, com diferenças relativamente pequenas nos valores médios e nos coeficientes de variação.

Os resultados mostraram que a principal influência sobre o índice de confiabilidade não decorre da origem da estimativa da resistência - experimental ou empírica - mas sim da forma como essa resistência é modelada do ponto de vista probabilístico. A análise pelo método FOSM, baseada na aproximação normal da resistência, resultou em índices de confiabilidade da ordem de $\beta \approx 3{,}2$. Por sua vez, o método FORM, ao permitir o tratamento de distribuições não normais, adotando distribuição lognormal nesse caso, conduziu a valores significativamente mais elevados, da ordem de $\beta \approx 4{,}4$, evidenciando a sensibilidade da análise à caracterização estatística das variáveis envolvidas.

Sob a ótica da aceitabilidade de risco, os níveis de probabilidade de falha obtidos neste estudo situam-se na faixa usualmente associada a obras de engenharia civil e geotécnica de grande porte. De forma conceitual, esses resultados podem ser relacionados aos domínios de aceitabilidade de risco propostos por Baecher e Christian, nos quais fundações e estruturas geotécnicas permanentes são geralmente associadas a

probabilidades anuais de falha da ordem de 10^{-3} a 10^{-4}, dependendo das consequências envolvidas. Embora não se tenha realizado uma análise explícita de consequências neste trabalho, os valores de confiabilidade obtidos são compatíveis com níveis de risco considerados aceitáveis para obras industriais, quando avaliados à luz desse referencial.

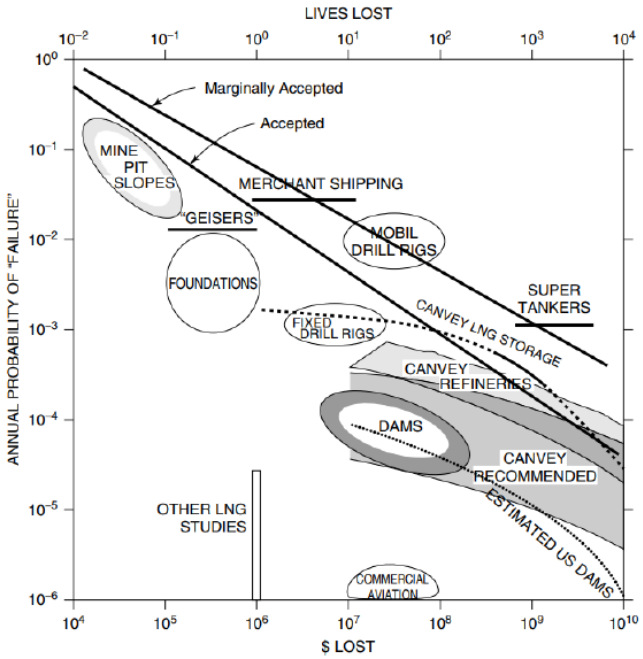


Figura 4. Gráfico de níveis de aceitação de risco (Fonte: Baecher e Christian).

Nesse sentido, a análise de confiabilidade não deve ser interpretada como um critério isolado de verificação, mas como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo posicionar o projeto em relação a níveis de risco implícitos e explicitando margens de segurança que permanecem ocultas nas abordagens determinísticas tradicionais. A associação entre índices de confiabilidade e domínios de aceitabilidade de risco, conforme discutido por Baecher e Christian, contribui para uma visão mais integrada do projeto, na qual segurança, custo e consequências de falha podem ser avaliados de forma mais racional.

Por fim, conclui-se que a incorporação sistemática de conceitos de confiabilidade ao projeto de fundações profundas representa um avanço metodológico relevante, especialmente em obras de grande porte e elevado impacto econômico. Estudos futuros podem aprofundar essa abordagem por meio da inclusão explícita de análises de consequências, avaliação de risco anualizado e calibração de níveis-alvo de confiabilidade, ampliando a integração entre projeto geotécnico e gestão de risco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Velloso, D. A., Lopes, F. R. (2010) Fundações. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil.

Murakami, D. K. (2015) *Novo procedimento para a realização de análise Capwap no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Escola Politécnica / USP, São Paulo.

Baecher, G. B.; Christian, J. T. (2003) Reliability and statistics in geotechnical engineering. John Wiley & Sons, Chichester. England.

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.

Hasofer, A. M.; Lind, N. C. (1974) Exact and invariant second-moment code format. Journal of the Engineering Mechanics division, v. 100, n. 1, p. 111-121.

Phoon, K. K. (2020) Reliability-based design in geotechnical engineering. CRC Press, Boca Raton, USA.