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/COBRAMSEG2026.5/26

Avaliação da Confiabilidade do Desempenho de Estacas Metálicas: Estudo de Caso

Dirney Cury Filho
Gerente Ténico, Gerdau S.A., São Paulo, Brasil, dirney.cury@gmail.com

Luiz Felipe Saes
Diretor, LSF Engenharia, São Paulo, Brasil, felipe1saes@hotmail.com

Alline Evangelista Silva
Coordenadora de Projetos, Apoio Assessoria e Projeto e Fundações, São Paulo, Brasil, alline.ev@gmail.com

RESUMO: A avaliação da confiabilidade em fundações profundas tem se mostrado uma ferramenta essencial para tomadas de decisão, otimizar projetos e reduzir incertezas associadas ao comportamento geotécnico. No presente trabalho é realizada uma análise de confiabilidade aplicada a um conjunto de estacas metálicas do tipo HP310x93, integrando dados de execução, provas de carga estática e ensaios dinâmicos. A metodologia empregada parte dos princípios estatísticos apresentados por Aoki em suas investigações sobre probabilidade de ruína em fundações, adaptando-os a um banco de dados real e abrangente, composto por 93 estacas cravadas a 35 m de profundidade, 2 provas de carga estáticas (PCE) e 4 ensaios de carregamento dinâmico (ECD). Inicialmente, foram tratados os registros de cravação de cada estaca, considerando parâmetros como energia de cravação, diagrama de cravação e resultados de nega e repique elástico. Os ensaios dinâmicos serviram como base para a calibração dos métodos de estimativa de capacidade de carga a partir dos dados de cravação, permitindo ajustar coeficientes e reduzir incertezas na estimativa das capacidades de carga real das estacas. As provas de carga estáticas foram utilizadas como referência de comportamento real, possibilitando validar as estimativas obtidas. Com a estimativa individual da capacidade de carga de todas as estacas, foi possível construir as curvas de solicitação (projeto) e resistência da obra, permitindo avaliar o fator de segurança real, considerando as variabilidades inerentes ao solo e à execução. A partir dessas distribuições, foram determinados a probabilidade de falha (Pf) e o índice confiabilidade β, parâmetros fundamentais em análises probabilísticas de segurança. Os resultados demonstram que o emprego integrado de dados de campo e ensaios complementares fornece uma visão mais realista e estatisticamente robusta da segurança das estacas metálicas estudas. A análise de confiabilidade se mostra especialmente relevante em obras onde a variabilidade geotécnica e a dispersão de parâmetros de execução podem impactar significativamente o desempenho global da fundação. O estudo reforça a importância da abordagem probabilística como ferramenta de engenharia, contribuindo para projetos mais eficientes, seguros e alinhados às práticas modernas de gestão de risco em geotecnia.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Metálicas, Confiabilidade de Ruína, Prova de Carga Estática.

ABSTRACT: Reliability assessment in deep foundations has proven to be an essential tool for decision-making, project optimization, and reducing uncertainties associated with geotechnical behavior. This study presents a reliability analysis applied to a group of steel piles (HP310x93), integrating installation records, static load tests, and dynamic loading tests. The adopted methodology is based on the statistical principles introduced by Nelson Aoki in his investigations on the probability of failure in foundations, adapting them to a comprehensive real database consisting of 93 driven piles installed to a depth of 35 m, 2 static load tests (SLT), and 4 dynamic load tests (DLT). Initially, the driving records of each pile were processed, considering parameters such as driving energy, driving logs, and measurements of set and elastic rebound. The dynamic tests were used as a basis for calibrating load capacity estimation methods derived from driving data, allowing for coefficient adjustment and reduction of uncertainties in the estimation of the actual pile capacities. The static load tests were used as a reference for real behavior, enabling validation of the obtained estimates. Based on the individual estimation of the load-bearing capacity of all piles, it was possible to construct the load (demand) and resistance distributions for the foundation system, allowing the evaluation of the actual factor of safety while considering the inherent variability of soil conditions and execution procedures. From these

This content is Public.

distributions, the probability of failure (Pf) and the reliability index (β) were determined, which are key parameters in probabilistic safety analyses. The results demonstrate that the integrated use of field data and complementary testing provides a more realistic and statistically robust assessment of the safety of the studied steel piles. Reliability analysis proves to be particularly relevant in projects where geotechnical variability and execution-related uncertainties may significantly affect the overall foundation performance. This study reinforces the importance of probabilistic approaches as an engineering tool, contributing to more efficient, safer designs aligned with modern risk management practices in geotechnical engineering.

KEYWORDS: Steel Piles, Reliability Analysis, Probability of Failure, Static Load Test.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de fundações profundas tem sido historicamente conduzido com base em abordagens determinísticas, nas quais a segurança estrutural e geotécnica é verificada por meio da adoção de fatores globais de segurança, levando em conta o estado limite de serviço e último. Embora esse procedimento seja amplamente consolidado na prática da engenharia, ele nem sempre representa de forma adequada as incertezas inerentes ao comportamento do solo, à variabilidade dos parâmetros geotécnicos e às condições reais de execução das fundações. Em especial em obras que envolvem grande número de estacas, as heterogeneidades naturais do subsolo e as variações observadas durante o processo executivo podem resultar em dispersões significativas na capacidade de carga dos elementos de fundação.

Nesse contexto, abordagens probabilísticas têm sido progressivamente incorporadas à engenharia geotécnica como forma de avaliar de maneira mais realista o nível de segurança das fundações. A análise de confiabilidade permite considerar as variabilidades associadas tanto às ações atuantes quanto às resistências mobilizadas, possibilitando estimar parâmetros como a probabilidade de falha (Pf) e o índice de confiabilidade (β). Esses indicadores fornecem uma medida quantitativa do desempenho esperado da fundação, contribuindo para decisões de projeto mais fundamentadas e para a otimização das soluções de engenharia. A Figura 1 ilustra o conceito de probabilidade de ruína entre a solicitação e resistência.

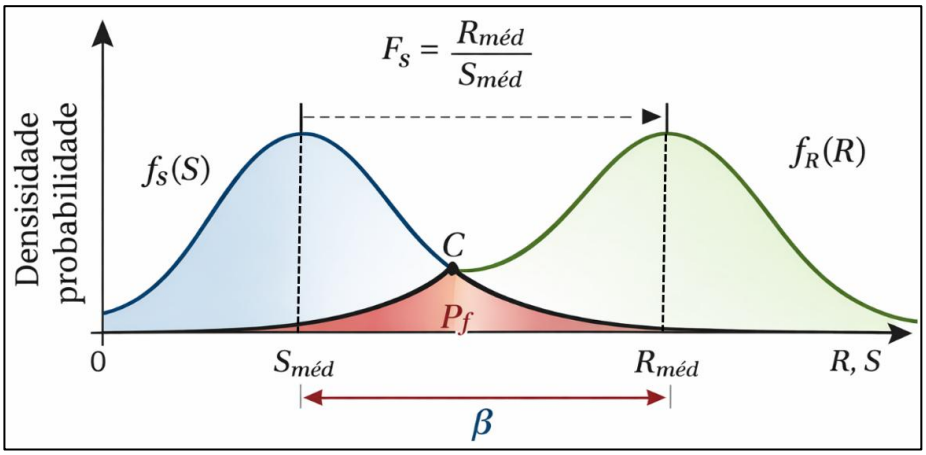


Figura 1. Curva de probabilidade de ruína.

Entre as contribuições pioneiras nessa área, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Nelson Aoki, que introduziu no Brasil conceitos probabilísticos aplicados à engenharia de fundações, propondo metodologias para avaliação da probabilidade de ruína de fundações profundas com base na comparação estatística entre as distribuições de resistência e solicitação (AOKI, 2002). Posteriormente, estudos clássicos conduzidos por Nelson Aoki e Dirceu de Alencar Velloso consolidaram importantes metodologias de estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de ensaios de campo, particularmente utilizando resultados de sondagens do tipo SPT (AOKI; VELLOSO, 1975). Esses métodos permanecem amplamente utilizados na prática de projeto de fundações no Brasil e constituem importante base para análises comparativas entre previsões teóricas e resultados observados em campo.

This content is Public.

No âmbito normativo brasileiro, a NBR 6122 (ABNT, 2019), estabelece diretrizes para o projeto e execução de fundações, recomendando a utilização de ensaios de campo, como provas de carga estáticas e ensaios dinâmicos, como ferramentas fundamentais para verificação do desempenho das estacas e validação das premissas adotadas no projeto. A norma também reconhece a importância da variabilidade geotécnica e da interpretação integrada dos dados de campo para avaliação da segurança das fundações.

Com o avanço normativo a partir de 2010, tornou-se possível dispor de bases de dados mais abrangentes provenientes de registros de cravação, ensaios de carregamento dinâmico e provas de carga estáticas. A integração dessas diferentes fontes de informação permite estimar de forma mais consistente a capacidade de carga das estacas e reduzir as incertezas associadas às previsões de desempenho. Nesse cenário, análises de confiabilidade baseadas em dados reais de campo representam uma ferramenta relevante para avaliar o comportamento global de sistemas de fundação e fornecer subsídios técnicos para a gestão de riscos em projetos geotécnicos.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma análise de confiabilidade aplicada a um conjunto de 93 estacas metálicas do tipo HP310x93, cravadas até 35 m de profundidade. O estudo integra registros de execução, resultados de ensaios de carregamento dinâmico e provas de carga estáticas, permitindo estimar a capacidade de carga individual das estacas e construir as distribuições estatísticas de resistência e solicitação da obra. A partir dessas distribuições, são determinados o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha do sistema de fundação, seguindo os princípios probabilísticos propostos por Aoki, N. e Cintra, J. C. A. (2010).

Os resultados obtidos contribuem para ampliar o entendimento sobre o comportamento estatístico de estacas metálicas cravadas e demonstram o potencial da análise de confiabilidade como ferramenta de avaliação e otimização de projetos de fundações profundas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização Geológica/Geotécnica

Para a caracterização do subsolo onde ocorreram as cravações, foi utilizada a sondagem SPT-T 128. Os resultados indicaram a presença de uma camada de argila siltosa até 15 m de profundidade, com valores de Nspt entre 10 e 17 golpes, seguida por uma camada de silte pouco arenoso até aproximadamente 35 m, com valores de Nspt entre 5 e 17 golpes. Sotoposto a esse material, foi identificada uma camada de areia fina a média, de medianamente compacta a muito compacta, com valores de Nspt crescentes com a profundidade. Não foi identificado nível de lençol freático. A Figura 2 apresenta o perfil geotécnico obtido na sondagem SPT-T 128.

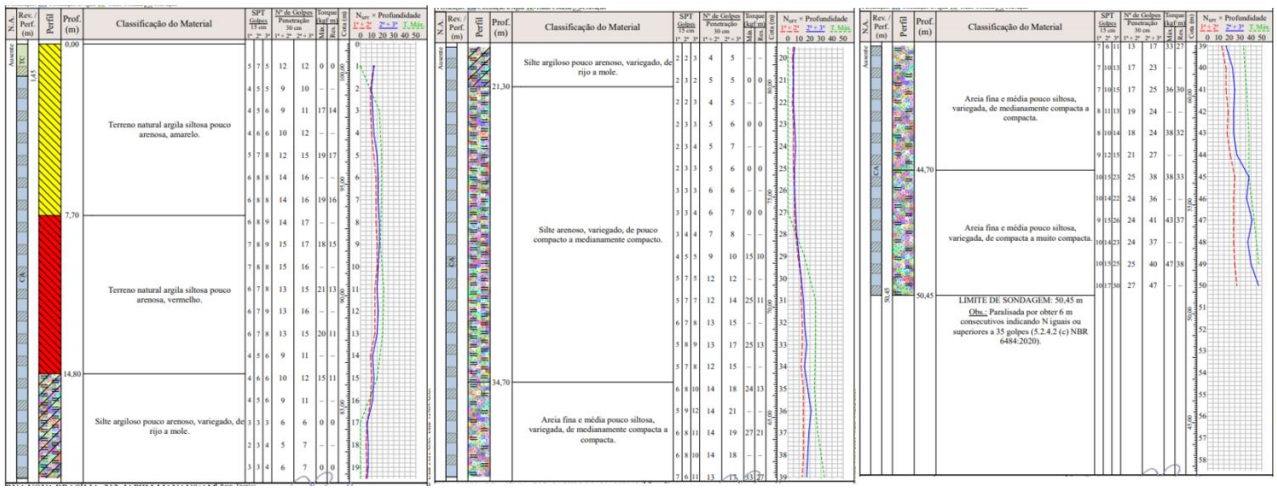


Figura 2. Sondagem SPT-T 128, local de cravação das estacas estudadas.

This content is Public.

2.2 Ensaios realizados

Dentre as 93 estacas cravadas, foram realizados quatro ensaios de carregamento dinâmico (ECD) e duas provas de carga estática do tipo rápida, conforme recomendações da NBR 16903 (ABNT, 2020). A Tabela 1 apresenta os resultados dos ECD, analisados por meio da metodologia CAPWAP, enquanto a Figura 3 apresenta os resultados das provas de carga estática.

Tabela 1. Resulmo dos ECD através do *Capwap*.

RESUMO DOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO CAPWAP			
Estaca	Seção da Estaca	Golpe analisado	Profun. da Crava. (m) / Carga do Ensaio (kN)
4	HP 310 x 93,0 (H)	2	**35** / **2047**
10	HP 310 x 93,0 (H)	2	**35** / **2014**
79	HP 310 x 93,0 (H)	2	**35** / **1987**
91	HP 310 x 93,0 (H)	6	**35** / **2130**

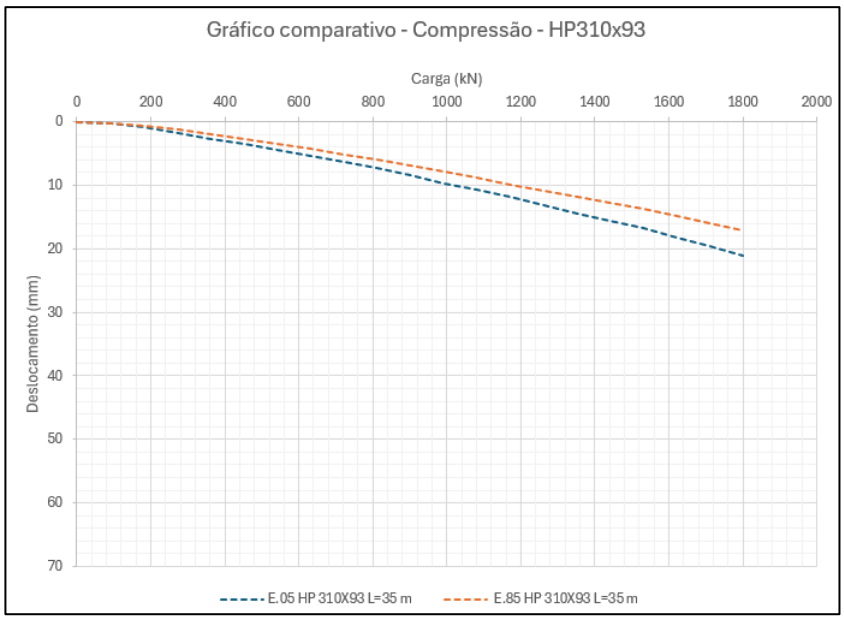


Figura 3. Prova de Carga Estática, tipo rápida, realizado as estacas E.05 e E.85.

Os resultados das provas de carga estática indicaram comportamento predominantemente elástico, com deslocamentos máximos de 21,11 mm e 17,08 mm para as estacas E.05 e E.85, respectivamente, sem evidências de ruptura geotécnica. Os ensaios de carregamento dinâmico indicaram mobilização de resistência da ordem de 2.000 kN (valor médio), sendo utilizados como base para calibração dos parâmetros de análise.

2.3 Análise das 93 estacas cravadas

Com base na metodologia a proposta de Querelli (2019) e o critério de análise S+D proposto por Aoki (1996), foram analisados os dados de nega, repique elástico, profundidade das estacas (fixada em 35 m em projeto), tipo de martelo, massa batente e altura de queda.

Inicialmente, foi construído um gráfico correlacionando as cargas obtidas em cada golpe dos ECD com a razão entre a energia teórica de cravação e o deslocamento total (S+D). A partir dessa análise, foi determinado o fator ζ (zeta), com valor de 1,4896, apresentado na Figura 4.

This content is Public.

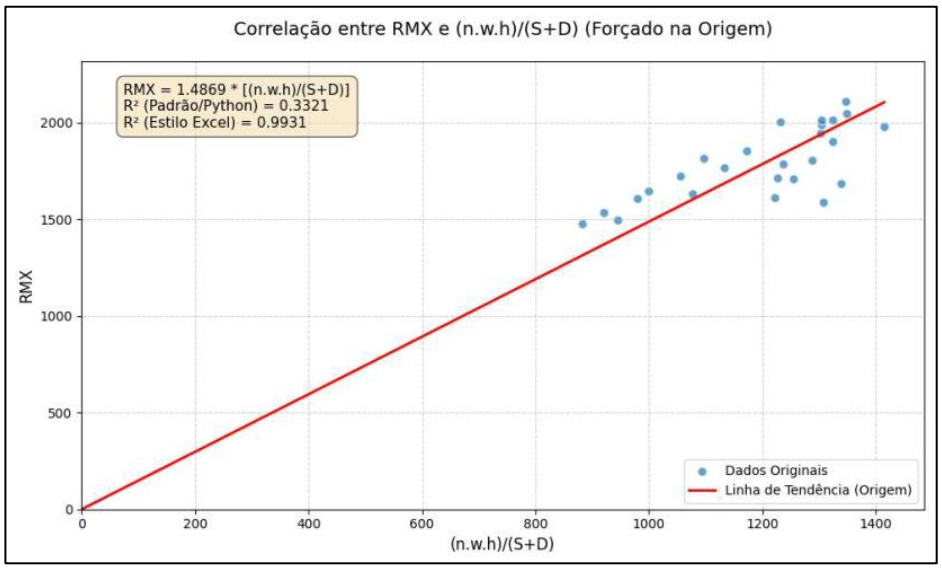


Figura 4. Calibração do "Zeta".

Na sequência, procedeu-se à calibração do parâmetro λ (lâmbida), conforme metodologia proposta por Querelli (2019), por meio da correlação entre os deslocamentos máximos (DMX) registrados nos ECD e o fator de ajuste definido pela Equação 1. O valor obtido para λ foi de 1,664, apresentado na Figura 5.

$$D \times [(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0,5} \quad (1)$$

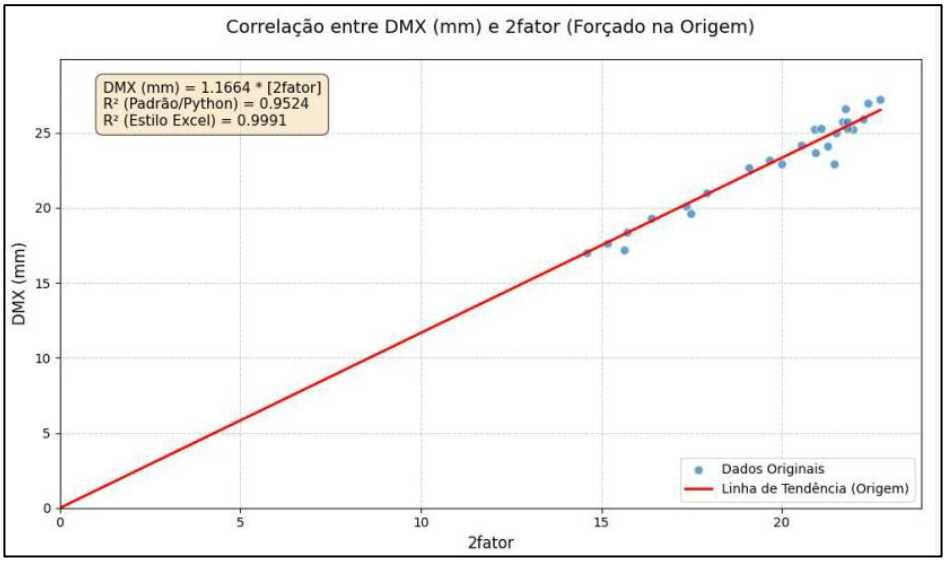


Figura 5. Calibração do Lâmbida

Com os parâmetros calibrados, foi possível estimar a capacidade de carga última das estacas a partir dos registros de cravação, utilizando as formulações propostas por Querelli (2019) e Aoki (1996). A Figura 6 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

$$E_{ef} = \eta \,.\, W \,.\, h = \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{D^2 . E . A}{L} \quad (2)$$

$$R_{mx} = \zeta \,.\, \frac{\eta \,.\, W \,.\, h}{s + D} \quad (3)$$



Figura 6. Valores médios obtidos após aplicação da metodologa.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.

A aplicação da metodologia proposta por Querelli (2019) permitiu a retroanálise do fator de segurança individual de cada estaca da obra. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos, considerando a carga de trabalho de 900 kN, conforme estabelecido no Projeto de Fundações.

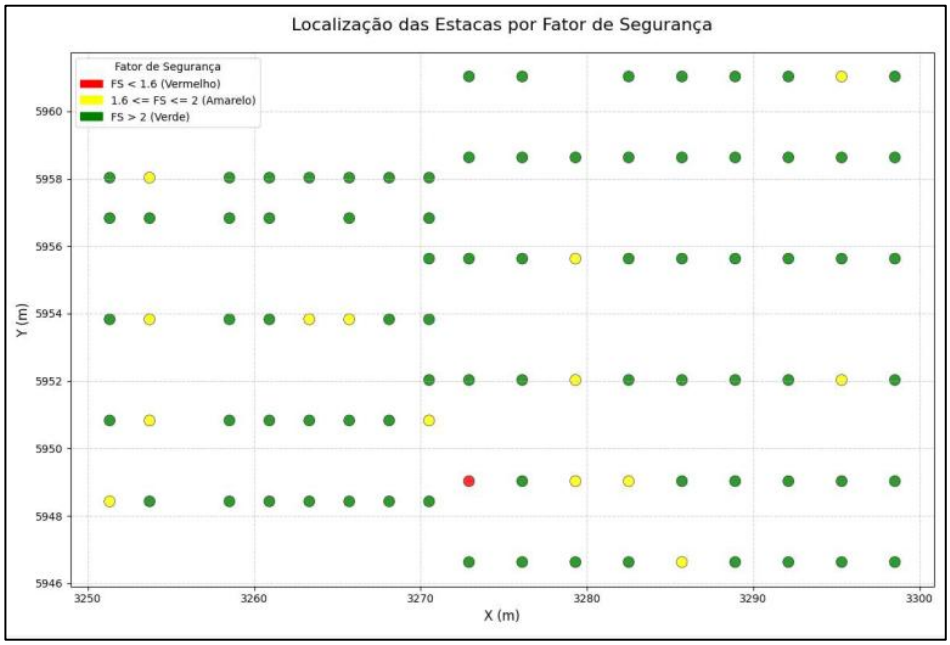


Figura 7. Fator de Segurança de cada estaca da obra retroanalisada.

Além da avaliação individual, foi realizada uma análise comparativa de confiabilidade entre a solicitação de projeto e a resistência estimada a partir dos dados de campo. Essa análise permitiu determinar o fator de segurança global, a probabilidade de falha (Pf) e o índice de confiabilidade (β) da fundação executada. Os resultados da análise de confiabilidade são apresentados na Figura 8, evidenciando o desempenho global do estaqueamento em relação às premissas adotadas em projeto.

This content is Public.

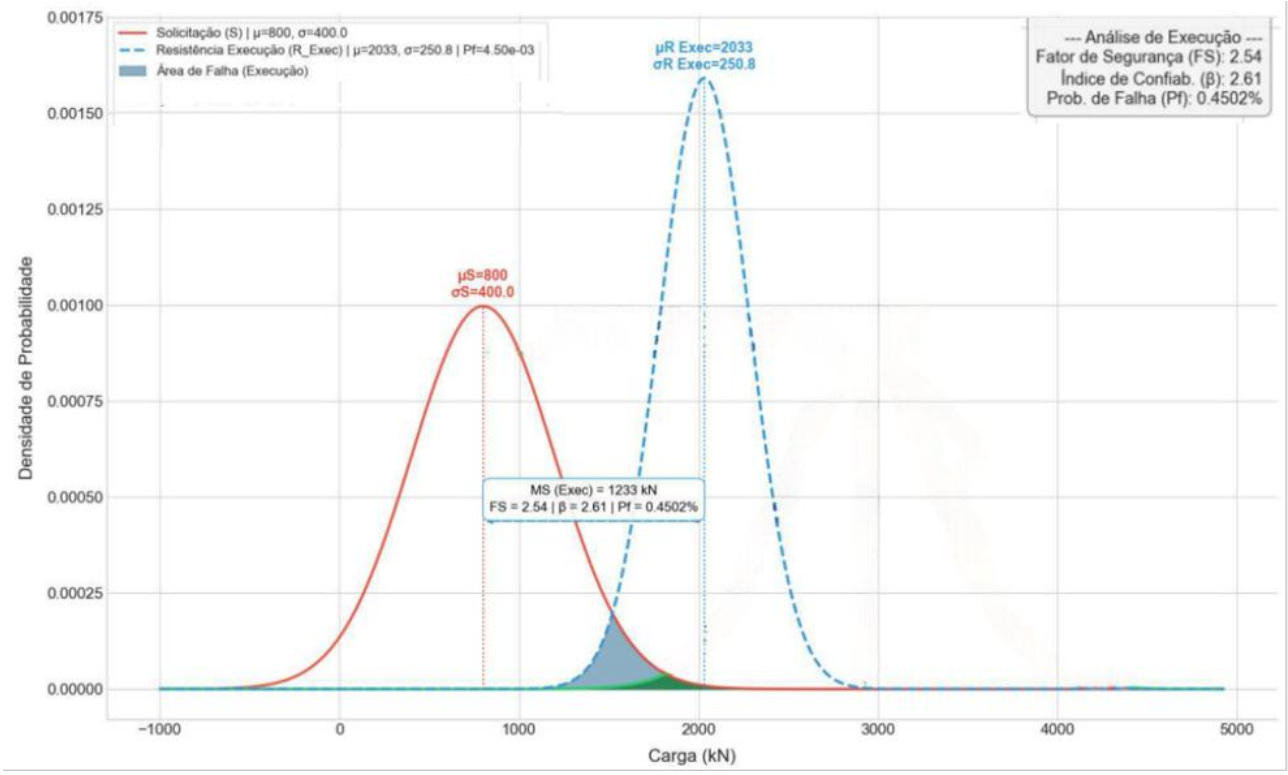


Figura 8. Análise de confiabilidade entre Projeto de Fundação e Execução.

5 CONCLUSÕES.

A aplicação da metodologia proposta por Querelli (2019), associada ao critério S+D de Aoki (1996), demonstrou-se adequada para a estimativa da capacidade de carga de estacas metálicas a partir de dados de cravação, permitindo a retroanálise consistente do desempenho das fundações.

A calibração dos parâmetros ζ (zeta) e λ (lâmbida), com base em ensaios de carregamento dinâmico, contribuiu significativamente para a redução das incertezas associadas às estimativas de capacidade de carga, evidenciando a importância da integração entre dados de campo e modelos empíricos.

A análise de confiabilidade demonstrou que a consideração da variabilidade dos parâmetros geotécnicos e executivos permite uma avaliação mais realista da segurança do sistema de fundação, possibilitando a determinação consistente do índice de confiabilidade (β) e da probabilidade de falha (Pf). Os resultados indicaram níveis de segurança compatíveis e superiores aos mínimos recomendados pela NBR 6122.

Observa-se que a abordagem probabilística fornece uma visão mais representativa da segurança quando comparada ao fator de segurança determinístico.

No estudo desenvolvido por Querelli (2019), as estacas metálicas apresentaram condição de nega fechada (inferior a 10 mm para 10 golpes). No presente trabalho, dentro do universo de 93 estacas com a mesma profundidade, todas as estacas apresentaram negas abertas, indicando que a metodologia analisada pode ser aplicada tanto para negas fechadas quanto abertas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) NBR 6122 *Projeto e execução de fundações profundas*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16930:2020, *Solo – Prova de Carga Estática em Fundação Profunda*, Rio de Janeiro

This content is Public.

Aoki, N. *Controle de cravação de estacas pré-moldadas baseado na nega e no repique elástico*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais – SEFE, 3, 1996, São Paulo. Anais… São Paulo: ABMS

Aoki, N.; Cintra, J. C. A. *Fundações por estacas: projeto geotécnico*, 2010, São Paulo. Ofixina de texto.

Querelli, A. (2019). *Monitoração Dinâmica na cravação de estacas: aplicabilidade da equação de Energy Approach e estimativas das tensões de compressão*, Dissertação de Mestrado, USP, 382p.

This content is Public.