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/COBRAMSEG2026.5/1

A influência de parâmetros geotécnicos na análise de fundações profundas carregadas axialmente submetidas a grandes deformações

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

Henrique Milan
Eng. Civil, UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, henriquefmilan@gmail.com

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

Tiago Luiz Costa da Silva
Mestrando, UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, tiagoluizcosta@mpf.mp.br

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

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise integrada do desempenho em estado limite de serviço de uma fundação profunda a partir da combinação de modelagem numérica, resultados de prova de carga e avaliação probabilística da confiabilidade. Inicialmente, os parâmetros geotécnicos foram obtidos a partir de sondagens SPT e organizados em camadas representativas do perfil de solo. Os módulos de elasticidade foram definidos com base nas recomendações de Fellenius, considerando a dependência com o nível de tensões efetivas. A resposta do sistema solo–estaca foi investigada por meio de simulações numéricas para diferentes combinações de rigidez das camadas, permitindo a construção de uma superfície de resposta do recalque em função dos módulos de elasticidade das camadas mais influentes. A calibração do modelo foi realizada utilizando resultados de prova de carga estática, mostrando boa concordância entre os recalques medidos e os valores previstos. Os resultados evidenciam a forte influência da rigidez da camada de apoio no comportamento de deformação da fundação e demonstram o potencial da integração entre modelagem numérica e análise probabilística como ferramenta de apoio à avaliação de desempenho de fundações profundas.

PALAVRAS-CHAVE: Palavras Mais Importantes, Mínimo de Três Palavras, Máximo de Seis Palavras, Separadas por Vírgulas.

ABSTRACT: This paper presents an integrated analysis of the serviceability limit state performance of a deep foundation based on the combination of numerical modeling, load test results, and probabilistic reliability assessment. Initially, geotechnical parameters were obtained from SPT soundings and organized into representative layers of the soil profile. The elastic moduli were defined based on Fellenius recommendations, considering their dependence on the effective stress level. The response of the soil–pile system was investigated through numerical simulations for different combinations of layer stiffness, allowing the construction of a settlement response surface as a function of the elastic moduli of the most influential layers. Model calibration was performed using static load test results, showing good agreement between measured and predicted settlements. The results highlight the strong influence of the stiffness of the bearing layer on the deformational behavior of the foundation and demonstrate the potential of integrating numerical modeling and probabilistic analysis as a supporting tool for the performance assessment of deep foundations.

KEYWORDS: Palavras chaves em inglês seguindo as mesmas regras da versão em português

1 INTRODUÇÃO

O desempenho de fundações de tanques de armazenamento apoiados em solos compressíveis tem sido amplamente discutido na literatura, sobretudo em razão dos riscos associados a recalques totais, diferenciais, distorções fora do plano e danos estruturais em costado, chapas de fundo e conexões de dutos. Estudos clássicos, como os de Marr (1982) e Andreani e Carr (2007), contribuíram para a classificação dos modos de recalque e para a definição de critérios de admissibilidade, posteriormente consolidados em documentos como a API 653 e em recomendações técnicas da PETROBRAS, a exemplo da N-270 e da N-1807.

O desempenho de fundações de tanques de armazenamento apoiados em solos compressíveis tem sido amplamente discutido na literatura, sobretudo em razão dos riscos associados a recalques totais e diferenciais, distorções fora do plano e danos estruturais em cascos, fundos e conexões de dutos. Estudos clássicos, como os de Marr (1982) e Andreani e Carr (2007), contribuíram para a classificação dos modos de recalque e para a definição de critérios de admissibilidade, posteriormente consolidados em documentos como a API 653 e em recomendações técnicas da PETROBRAS, a exemplo da N-270 e da N-1807.

Nesse contexto, o presente trabalho investiga a influência da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, em especial do módulo de elasticidade do solo, no comportamento de fundações profundas carregadas axialmente. O estudo foi desenvolvido a partir de um caso de radier estaqueado implantado no Porto de Suape/PE, com estacas hélice contínua de 1,0 m de diâmetro e 15 m de comprimento. A abordagem combina interpretação de sondagens SPT, definição de camadas equivalentes, modelagem numérica da estaca, calibração com prova de carga estática e análise probabilística dos recalques em estado limite de serviço. O objetivo é avaliar a sensibilidade da resposta do sistema à rigidez dos estratos e discutir a calibração dos módulos adotados em projeto.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Na área específica do empreendimento analisado neste trabalho, localizam-se dois grupos de tanques de armazenamento de combustíveis da Vibra Energia: um conjunto com fundação superficial (tanques TQ-21, TQ-22, TQ-24 e TQ-25) e outro com fundação em radier estaqueado (tanques TQ-28 a TQ-35), Figura 1. A região apresenta subsolo que varia desde solos residuais mais resistentes aflorantes até aluviões de solo muito mole de mangue, com espessas camadas de sedimentos recentes de origem flúvio-lagunar e marinha, e nível freático raso, em geral entre 2,5 m e 3,5 m de profundidade. Para o projeto com radier estaqueado foram executados 29 furos de SPT até cerca de 40 m, sendo oito sondagens posicionadas aproximadamente no centro dos tanques e as demais distribuídas ao longo dos perímetros. As figuras 1 representa o posicionamento das sondagens e o resumo dos resultados. A figura 2 simula uma seção transversal do terreno com os respectivos resultados



Figura 1 – Parque de tancagem Vibra Energia. Fonte: Relatório Técnico Vibra Energia

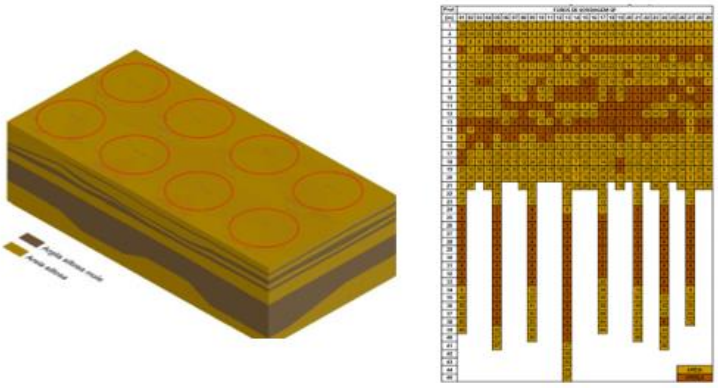


Figura 2 – Modelagem das sondagens e exemplo seção transversal do TQ-34. Fonte: O Autor

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Entre as formulações mais utilizadas para representar a variação do módulo de deformação com o estado de tensões destaca-se a expressão proposta por Janbu (1963), trabalhada por Fellenius (2024), na qual o módulo tangente do solo pode ser expresso em função da tensão efetiva média, por meio de uma relação potencial, equação 1. O módulo de deformação do solo foi estimado a partir da abordagem proposta por Fellenius (2024), baseada na formulação originalmente desenvolvida por Janbu (1963), que relaciona o módulo tangente com o nível de tensões efetivas atuantes no solo. O módulo tangente é expresso conforme expressão 1. Onde "m" é o número do módulo, "j" é o expoente dependente da tensão, σ' é a tensão efetiva média atuante e σ_r é a tensão de referência.

$$M_t = m\sigma_r \left(\frac{\sigma'}{\sigma_r}\right)^{1-j} \tag{1}$$

Nessa formulação, o valor de j tende a ser maior em solos arenosos, refletindo maior sensibilidade da rigidez ao confinamento, e menor em solos argilosos, especialmente em materiais moles, nos quais a rigidez apresenta menor dependência do estado de tensões. Fellenius (2024) apresenta faixas típicas para os parâmetros m e j, que podem ser associadas ao tipo de solo e ao seu grau de compacidade ou consistência.

Do ponto de vista estatístico, os parâmetros geotécnicos apresentam variabilidade significativa em razão da heterogeneidade natural dos depósitos, das incertezas associadas à amostragem e das limitações dos métodos de ensaio. Phoon e Kulhawy (1999a, 1999b) mostram que os coeficientes de variação de parâmetros de resistência e deformabilidade podem situar-se, tipicamente, entre 15% e 30%, dependendo do tipo de solo e da qualidade dos dados disponíveis.

Os autores destacam que a adoção de um único valor determinístico para o módulo de elasticidade pode conduzir a previsões pouco representativas. No presente trabalho, a formulação de Janbu (1963) com contribuição de Fellenius (2024) foi utilizada para definir os módulos de elasticidade das camadas geotécnicas representativas do perfil analisado. Esses módulos constituíram os parâmetros de entrada da modelagem numérica da estaca.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em cinco etapas principais: (i) tratamento dos resultados de SPT na área do tanque TQ-34, especialmente para definir as camadas e condições para simulação numérica (ii) definição de camadas geotécnicas equivalentes e estimativa dos módulos de elasticidade conforme Jambu (1963), (iii) modelagem numérica da estaca, (iv) calibração do modelo com prova de carga estática; (v) análise da probabilidade de falha dos recalques em estado limite de serviço

5 RESULTADOS

5.1 Modelo probabilístico

A variabilidade da deformação do solo foi introduzida por meio determinístico aplicado ao parâmetro m, considerado variável aleatória independente em cada camada. Seguindo recomendações da literatura geotécnica, adotou-se distribuição normal para representar a variabilidade natural dos módulos de elasticidade na superfície de resposta. A Tabela 2 apresenta os módulos de elasticidade utilizados nas análises numéricas. Inicialmente, foram realizadas 12 simulações determinísticas com diferentes combinações dos módulos de elasticidade das camadas 1, 2 e 3, conforme a Tabela 3, com o objetivo de construir uma superfície de resposta do recalque em função dos parâmetros mais influentes. A partir dessa superfície de resposta, foi executada uma etapa probabilística baseada em 20.000 simulações de Monte Carlo, utilizando as distribuições normais dos resultados das simulações numéricas a partir da análise de sensibilidade dos dados. A resposta de interesse considerada foi o recalque correspondente à carga de 4100 kN. A probabilidade de falha foi definida em função da excedência de limites admissíveis de recalque, segundo a função de estado limite $g = s_{adm} - s$; em que s_{adm} é o recalque admissível e sé o recalque obtido na superfície de resposta. Foram analisados limites admissíveis de 70 mm e 80 mm.

Tabela 2 – Módulos de elasticidade utilizados nas simulações

Camada	Profundidade	j	m	E médio (MPa)	$E_{médio}$ (Mpa)	COV E
Camada 1 (C1)	0 – 15 m	0,5	100	17,6		
			115	19,9	21,7	0,15
			125	21,7		
			150	26,0		
Camada 2 (C2)	15 – 23 m	0,75	250	30,4		
			300	36,5	42,6	0,20
			350	42,6		
			400	48,7		
Camada 3 (C3)	23 – 38 m	0	5	0,5		
			10	1,0	1,5	0,30
			15	1,5		
			20	2,0		
Camada4 (C4)	> 38 m	1	—	80 (fixo)		

5.2 Modelagem numérica

Estabelecida a estatigrafia do terreno com base nas sondagens SPT e separadas as camadas conforme item anterior, foi idealizado um perfil para simulação numérica de elementos finitos. O software utilizado para a análise foi o ABAQUS e modelo constitutivo elastoplástico com critério de plastificação de Mohr Coulomb. Na modelagem a malha foi refinada mais próxima a área de influência dos esforços. No topo da estaca foi aplicada um deslocamento de 20cm, compatível com as provas de carga para efeito de comparação. A figura 3 mostra as camadas, malha de elementos finitos. A tabela 3 sintetiza as simulações numéricas para análise de sensibilidade, onde C1, C2, C3 e C4, referem-se as propriedades de módulo das camadas de 1 a 4. Demais

parâmetros adotados no modelo foram considerados fixos (ângulo de atrito foi considerado 31° devido ao objetivo estar concentrado na deformação).

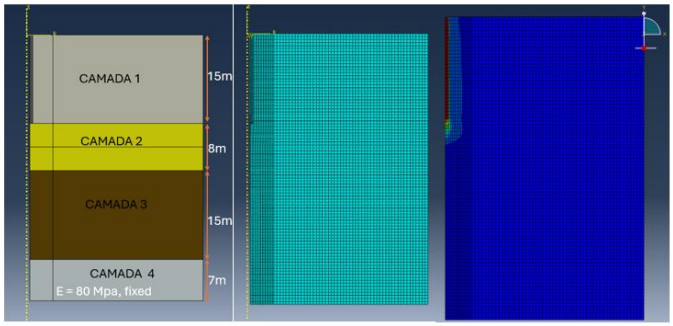


Figura 3. Modelagem de elementos finitos. Fonte: O autor

Tabela 3 – Casos de simulação para análise de sensibilidade

Caso	E (MPa) - Camada 1	E (MPa) - Camada 2	E (MPa) - Camada 3	E (MPa) - Camada 4	Tipo / objetivo
1	21,7	42,6	1,5	80	Sensibilidade: Média
2	17,6	42,6	1,5	80	Sensibilidade: C**1 min**
3	26	42,6	1,5	80	Sensibilidade: C**1 max**
4	21,7	48,7	1,5	80	Sensibilidade: C**2 max**
5	21,7	42,6	0,5	80	Sensibilidade: C**3 min**
6	21,7	42,6	2	80	Sensibilidade C**3 max**
7	17,6	30,4	0,5	80	**Pior caso** (todos min)
8	26	48,7	2	80	**Melhor caso** (todos max)
9	17,6	42,6	0,5	80	Interação: C**1 min + C3 min**
10	26	48,7	3	80	Influência aumento de **C3**
11	26	48,7	4	80	Influência aumento de **C3**
12	26	48,7	6	80	Influência aumento de **C3**

A variação individual dos módulos permitiu avaliar a influência relativa de cada camada na resposta global do sistema solo–estaca. Os resultados, figura 4, indicam que a Camada 2 exerce a maior influência no comportamento do sistema, seguida pela Camada 1, enquanto a Camada 3 apresenta influência significativamente menor. A figura 5 mostra o exemplo da calibração do modelo numérico, comparativo direto entre medida de ensaio e resultado típico numérico obtido.

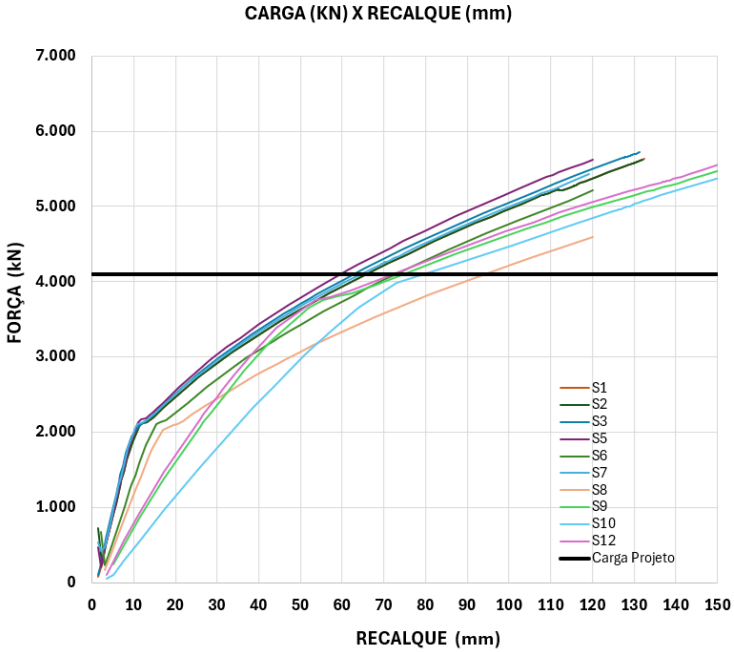


Figura 4. Resultado das simulações numéricas. Fonte: O autor

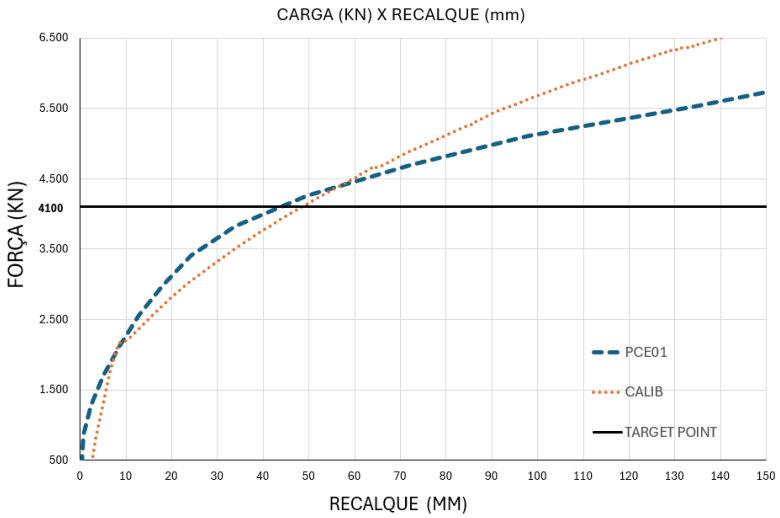


Figura 5. Comparação com modelo calibrado e prova de carga. Fonte: O autor

5.3 Análise de confiabilidade

Na etapa probabilística, foram geradas 20.000 simulações aleatórias dos resultados das superfícies de resposta das camadas, respeitando suas distribuições normais. Para cada simulação, o recalque correspondente foi obtido por interpolação na superfície de resposta previamente construída.

A aplicação da simulação de Monte Carlo resultou na obtenção da distribuição probabilística do recalque para a carga de serviço de 4100 kN. A distribuição obtida apresenta comportamento, com média de 49 mm e desvio padrão de 11,5 mm, refletindo a variabilidade introduzida pelos módulos de elasticidade das camadas.A Figura 6 apresenta as distribuições probabilísticas de recalque resultantes das simulações numéricas já com a análise dos limites admissíveis de serviço. Observa-se que, para o limite de 80 mm, a probabilidade de excedência permanece relativamente baixa, indicando desempenho satisfatório do sistema sob condições de serviço. Para o limite mais restritivo de 70 mm, a probabilidade de falha aumenta significativamente, refletindo a proximidade entre o limite adotado e o valor médio de recalque previsto.

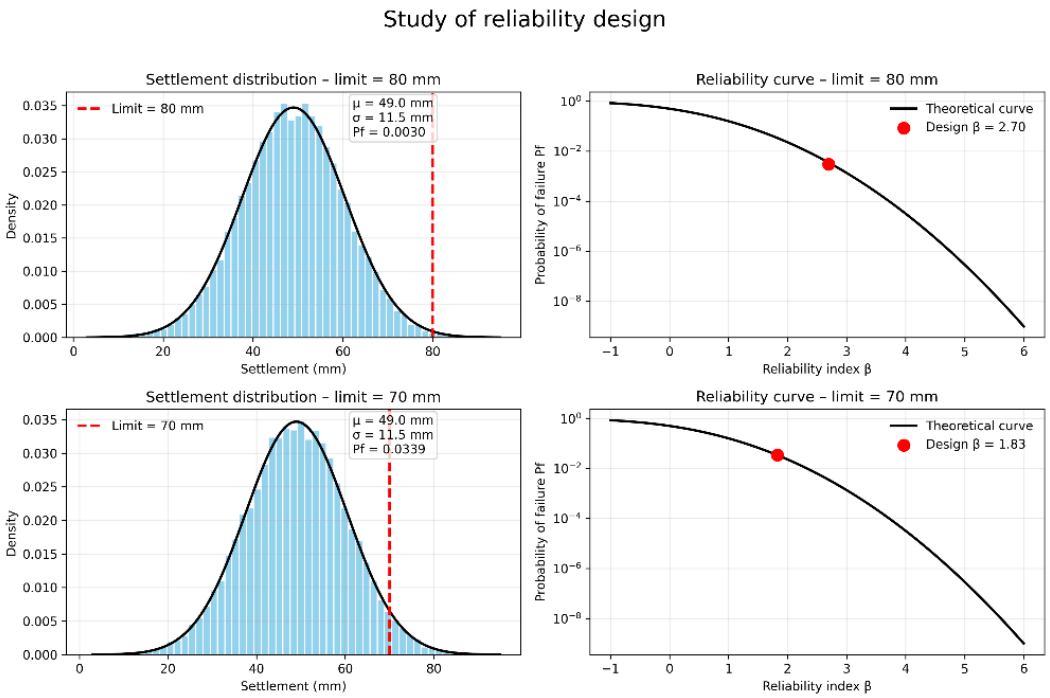


Figura 6. Análises de confiabilidade. Fonte: O autor

A figura 7 apresenta a superfície de resposta do recalque obtida a partir das simulações numéricas realizadas para diferentes combinações dos módulos de elasticidade das camadas 2 e 3. As linhas de contorno correspondem aos limites de recalque de 70 mm e 80 mm, permitindo identificar regiões de desempenho associadas aos critérios de serviço adotados.

Observa-se que reduções no módulo de elasticidade da camada 2 resultam em aumentos significativos no recalque da fundação, evidenciando a forte influência desse estrato no comportamento deformacional do sistema solo–estaca. Por outro lado, variações no módulo da camada 3 produzem alterações menos expressivas na resposta global, o que é consistente com o fato de a ponta da estaca estar posicionada na camada 2.

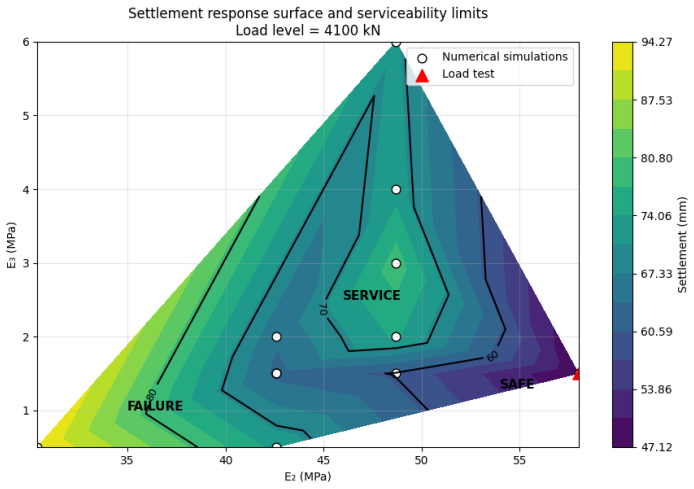


Figura 7. Superfície de resposta do recalque no plano E2 – E3 com contornos de recalque de 60, 70 e 80mm para o nível de carregamento de 4100KN. Fonte: O autor.

6 CONCLUSÃO

A calibração do modelo numérico com base na prova de carga estática resultou em boa concordância entre os valores calculados e medidos, com recalque de aproximadamente 47 mm para o modelo final (E_2 = 58 MPa) frente ao valor observado de 49,6 mm. A análise probabilística, realizada por simulação de Monte Carlo, indicou coeficiente de variação do recalque da ordem de 24%, evidenciando a influência da variabilidade da rigidez das camadas, principalmente da camada de apoio da ponta da estaca. Os resultados mostraram que a probabilidade de falha é fortemente dependente do limite admissível adotado, sendo reduzida para valores da ordem de 80 mm e significativamente mais elevada para limites inferiores a 70 mm. De forma geral, os resultados indicam que a abordagem adotada, combinando modelagem numérica calibrada e análise probabilística, permite avaliar de forma consistente o desempenho em serviço de fundações profundas e fornece subsídios técnicos para definição de critérios de projeto mais compatíveis com o comportamento observado em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.

Andreani, M.; Carr, G. (2007). *Settlement and Distortion Criteria for Steel Storage Tanks with Emphasis on API 653*. Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference.

API (2018). *API 653 – Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*. American Petroleum Institute.

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

Fellenius, B. H. (2024). *Basics of Foundation Design*. Electronic Edition. Sidney, Canada.

Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. In: *Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Wiesbaden.

Marr, W. A. (1982). Ground settlement and distortion of structures. In: *Proceedings of the Conference on Settlement of Structures*. ASCE.

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

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