DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/61

Estudo comparativo de métodos de previsão de capacidade de carga em solos estabilizados com cimento

Alysson Victor Daniel Ricarte
Egresso do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, alyssonvictor78@gmail.com

Carina Silvani
Doutora Professora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Vitor Braga de Azevedo
Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

Juliette Macena de Souza
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, juliette-souza@hotmail.com

Auanny Alícia Alves da Silva
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, auannyaliciasilva@gmail.com

RESUMO: As fundações superficiais representam uma solução economicamente atrativa para obras de pequeno e médio porte. Contudo, sua aplicabilidade é diretamente condicionada pela capacidade de carga do solo de fundação. Camadas de baixa capacidade de suporte inviabilizam esta solução, impondo a adoção de fundações profundas, que são, em geral, mais onerosas. Neste contexto, o melhoramento de solo com cimento surge como uma alternativa técnica e economicamente viável. A implementação segura desta técnica, no entanto, é indissociável da quantificação precisa do incremento de resistência e da melhoria dos parâmetros geotécnicos do solo tratado. Assim, o presente trabalho objetivou avaliar a acurácia de diferentes métodos de previsão de capacidade de carga de fundações superficiais assentes em solo melhorado com cimento. Para isso, os resultados experimentais da prova de carga de Rossi (2019) foram comparados com as previsões teóricas dos seguintes métodos: Meyerhof (1974), Thomé (1999), Meyerhof e Hanna (1978) e Brinch-Hansen (1970). As provas de carga foram realizadas num solo estabilizado com 7% de cimento CP V-ARI, disposto em camadas de 30 cm de espessura e larguras variáveis (45, 60 e 90 cm). Constatou-se que os métodos de cálculo supracitados, em suas formas originais, são ineficazes ou inadequados para prever com segurança a capacidade de carga de solos melhorados com cimento nas configurações analisadas. A tendência de superestimar os valores, especialmente em geometrias maiores, representa um risco inaceitável para o dimensionamento geotécnico. Os resultados reforçam a necessidade de mais estudos na área, visando o desenvolvimento ou a calibração de um método de cálculo seguro e eficaz para esta solução, dadas as suas evidentes vantagens econômicas para fundações superficiais.

PALAVRAS-CHAVE: Melhoramento de solos, Prova de carga, Dimensionamento, Fundação superficial.

ABSTRACT: Shallow foundations represent an economically attractive solution for small and medium-sized projects. However, their applicability is directly conditioned by the bearing capacity of the foundation soil. Layers with low bearing capacity make this solution unfeasible, requiring the adoption of deep foundations, which are generally more expensive. In this context, soil improvement with cement emerges as a technically and economically viable alternative. The safe implementation of this technique, however, is inseparable from

the precise quantification of the increase in resistance and the improvement of the geotechnical parameters of the treated soil. Thus, this work aimed to evaluate the accuracy of different methods for predicting the bearing capacity of shallow foundations resting on soil improved with cement. To this end, the experimental results of the Rossi (2019) load test were compared with the theoretical predictions of the following methods: Meyerhof (1974), Thomé (1999), Meyerhof and Hanna (1978), and Brinch-Hansen (1970). The load tests were performed on soil stabilized with 7% CP V-ARI cement, arranged in layers 30 cm thick and with variable widths (45, 60, and 90 cm). It was found that the aforementioned calculation methods, in their original forms, are ineffective or inadequate for reliably predicting the bearing capacity of cement-improved soils in the analyzed configurations. The tendency to overestimate the values, especially in larger geometries, represents an unacceptable risk for geotechnical design. The results reinforce the need for further studies in this area, aiming at the development or calibration of a safe and effective calculation method for this solution, given its evident economic advantages for shallow foundations.

KEYWORDS: Soil improvement, Load test, Foundation Design, Shallow foundation.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de fundações é considerado uma das etapas mais críticas da construção civil, representando, em média, entre 10% a 15% do custo total de uma obra, exigindo maior rigor técnico no equilíbrio entre a segurança estrutural e a viabilidade econômica (Alsanabani *et al.*, 2023; Azhim; Prakoso, 2018). É comum que, via de regra, as fundações superficiais sejam a primeira escolha dos projetistas devido ao baixo custo de execução e simplicidade executiva, mas sua aplicação é limitada ao se deparar com solos de baixa capacidade de carga ou recalques excessivos (Buabbas, 2021; Shah *et al.*, 2025). Prezando pela vida útil e integridade estrutural, a ação mais lógica é a adoção de fundações profundas (estaqueamento), sendo notável que sua aplicação é mais cara, mais complexa e, em determinadas circunstâncias, economicamente inviáveis (Consoli *et al*., 2020).

Como alternativa a esse impasse, a técnica de melhoramento de solo, especialmente a estabilização química com materiais cimentícios, tem ganhado maior destaque nas pesquisas como alternativa estratégica à substituição de solos problemáticos. Sua finalidade principal é a criação de uma camada de reforço abaixo da base da fundação, assim como um sistema de camada dupla, o qual redistribui as tensões de modo a elevar a capacidade de suporte (Consoli *et al*., 2020). Desse modo, é possível realizar fundações do tipo sapata em uma maior diversidade de solos, tal como solos de baixa resistência, residuais de baixa coesão e altamente compressíveis (Barman; Dash, 2022).

De acordo com Nawaz *et al.* (2022), o design de fundação mais vantajoso sempre será aquele que satisfaz os requisitos técnicos de segurança enquanto gera o mínimo custo de construção. Complementado pelos estudos de Shah *et al.* (2025), reforça-se que a viabilidade econômica não é atingida em muitos projetos, dado que os métodos convencionais simplificam o comportamento do solo e se tornam excessivamente conservadores, sendo necessário buscar soluções mais eficientes e equilibradas.

Apesar dos benefícios práticos e econômicos evidentes na adoção do solo-cimento, a literatura técnica ainda carece de um consenso sobre qual método analítico melhor descreve o comportamento de ruptura dessa configuração estratificada, vista como “camada rígida sobre uma base compressível”. Modelos clássicos de capacidade de carga, como os de Brinch-Hansen (1970), Meyerhof (1974), Meyerhof e Hanna (1978) e Thomé (1999) foram originalmente desenvolvidos para premissas simplificadas que envolvem meios homogêneos e isotrópicos, o que pode levar a projetos excessivamente conservadores quando comparados aos dados experimentais *in situ*.

Aksoy e Kayaalp (2025) reforçam que as teorias clássicas fundamentam a base de cálculo para a mecânica dos solos clássica, mas assumem condições específicas de um meio elástico e homogêneo que dificilmente irá refletir as condições reais de solos estratificados ou de maior heterogeneidade. Para um estudo comparativo de métodos de previsão de capacidade de carga em solos estabilizados com cimento, essa distinção é fundamental, visto que a técnica de estabilização rompe com as premissas assumidas por esses modelos tradicionais.

O presente trabalho busca avaliar a fidedignidade de diferentes métodos de previsão de capacidade de carga, confrontando-os com resultados experimentais de provas de carga sobre placa realizados por Rossi (2019). O objetivo é identificar a sensibilidade das formulações às variações geométricas do reforço e discutir a viabilidade técnica e consumo de insumos da adoção de camadas de solo-cimento como reforço para fundações superficiais em solos residuais.

2 METODOLOGIA

O estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada e qualitativo-quantitativa, baseada em uma análise comparativa entre resultados experimentais das provas de carga de Rossi (2019) e modelos teóricos de previsão, visando assim determinar o método de melhor representatividade quanto a resistência real da fundação em campo.

2.1 Caracterização do campo experimental

Os ensaios foram conduzidos no campo experimental localizado no Bairro São José na cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, ao lado do Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura (CETEC) na Universidade de Passo Fundo (UPF).

O perfil geotécnico local é caracterizado por um solo residual de basalto, cujas propriedades, determinadas por Dalla Rosa et al. (2003, 2004a; 2004b), indicam uma matriz predominantemente argilosa com comportamento plástico (Tabela 1). Também é preciso ressaltar que, para a execução das camadas de reforço (solo-cimento), foi selecionada e utilizada a areia de Osório que, conforme a caracterização de Cruz (2008) apresentada na Tabela 1, trata-se de uma areia fina uniforme, típica de depósitos eólicos da região.

Tabela 1. Caracterização do solo residual de basalto e da areia de Osório

Parâmetro	Residual de Basalto	Areia de Osório
Peso específico natural	15,6 kN/m^3	-
Peso específico dos grãos	27,5 kN/m^3	26,5 kN/m^3
Areia grossa	-	-
Areia média	-	35%
Areia fina	28,2 %	65%
Silte	7,2 %	-
Argila	64,6 %	-
Coeficiente de uniformidade	-	2,11
Coeficiente de curvatura	-	1,15
Índice de vazios mínimo	-	0,60
Índice de vazios máximo	-	0,85
Diâmetro efetivo (D_{10})	-	0,09 mm
Diâmetro médio (D_{50})	-	0,17 mm
Limite de liquidez	54 %	-
Limite de plasticidade	35 %	-
Índice de plasticidade	19 %	-

Fonte: Adaptado de Dalla Rosa et al. (2003, 2004a, 2004b); Carreta (2018); Cruz (2008).

Seguindo o estudo de Cruz (2008), Rossi (2019) adotou o teor de 7% de cimento Portland (CP V – ARI) para a estabilização química da areia de Osório. Segundo o autor, esta dosagem representa um ponto de equilíbrio: teores superiores tornariam a solução economicamente onerosa, enquanto valores inferiores resultariam em ganhos de desempenho pouco significativos. Os parâmetros de moldagem foram fixados em 10% de umidade e massa específica aparente seca (ρ_d) de 1,60 g/cm³.

Rossi (2019) conduziu ensaios de compressão triaxial consolidados e drenados (CD) do solo-cimento, adotando tensões efetivas de confinamento (p'_0) de 75, 150 e 225 kPa. Em seguida, os corpos de prova submetidos aos testes foram extraídos da camada de reforço com dimensões de 45 cm. Com base

nos dados obtidos, a Tabela 2 apresenta os parâmetros considerados para o solo residual e para o solo-cimento.

Tabela 2. Parâmetros adotados para estimativa de carga de ruptura

Parâmetro	Solo residual	Solo-cimento
Coesão (kPa)	9,52	200,03
Ângulo de atrito (°)	30,50	40,54

Fonte: Adaptado de Carreta (2018); Rossi (2019).

2.2 Provas de carga sobre placa

A avaliação do desempenho mecânico do sistema solo-reforço foi realizada através de 4 provas de carga utilizando uma placa rígida de 30 cm de diâmetro, simulando uma fundação superficial. O programa experimental foi realizado com uma prova sobre o solo residual natural (referência) e três provas sobre camadas de solo-cimento com largura de 45, 60 e 90 cm (Figura 1). Em todos os casos, a profundidade da camada de solo-cimento foi mantida constante em 30 cm, permitindo isolar o efeito da variação da largura do reforço na capacidade de suporte,

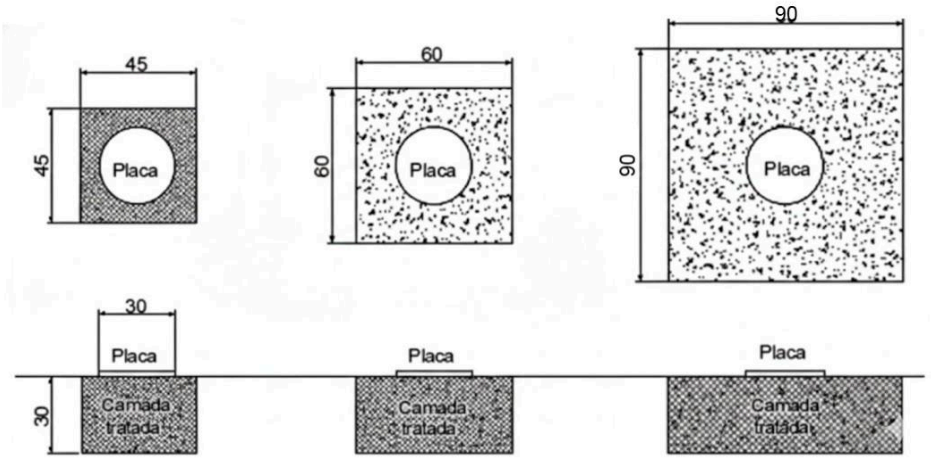


Figura 1. Esquema dos ensaios de prova de carga sobre placa
Fonte: Adaptado de Rossi (2019)

A Figura 2 ilustra as curvas carga-recalque obtidas por Rossi (2019) nas provas de carga. Os dados confirmam a eficácia do melhoramento, evidenciando um aumento na capacidade de carga do conjunto, visto que a razão de maiores ganhos de resistência é diretamente proporcional às dimensões em planta da camada de reforço do sistema solo-cimento.

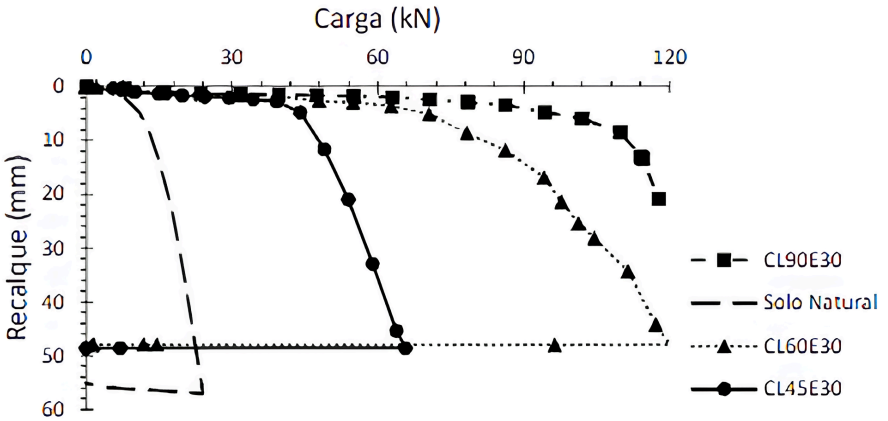


Figura 2. Resultado das provas de carga sobre placa
Fonte: Rossi (2019)

2.3 Cálculo da capacidade de suporte

O cálculo da capacidade de suporte dos reforços de solo-cimento foi feito a partir de 4 métodos diferentes, buscando fazer as considerações que melhor representem a situação real de uma camada resistente e rígida sobre um solo menos resistente e plástico. Assim sendo, adotou-se as seguintes premissas iniciais:

- Para Brinch-Hansen (1970), a capacidade de carga é calculada em um meio semi-infinito, utilizando os fatores de forma e profundidade para ajustar a geometria da placa;
- Para Meyerhof (1974), é aplicado sob uma camada de areia densa sobreposta a uma argila mole;
- Para Meyerhof e Hanna (1978), o modelo considera o efeito de punção de uma camada resistente de pequena espessura sobre um depósito de menor suporte;
- Para Thomé (1999), considera-se um solo estratificado com camada superior cimentada de extensão infinita, havendo a ressalva de que não é possível retratar bem as diferentes situações de reforço.

As simulações reproduziram as condições exatas de contorno experimentais de Rossi (2019). Considerando tanto a geometria exata da camada melhorada quanto às dimensões do elemento de fundação, adotando a geometria real do reforço e as dimensões da placa de prova de carga de 30 cm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos parâmetros estabelecidos para o solo natural (sem melhoramento), a Figura 3 apresenta a comparação entre a capacidade de suporte obtida experimentalmente por Dalla Rosa et al. (2003) e a estimativa teórica de Terzaghi (1943). Para o ensaio de placa com diâmetro de 30 cm no solo residual de basalto, observa-se que o valor medido foi bem próximo do estimado, logo esta proximidade ratifica a eficácia da formulação clássica para estimativas em solos naturais e homogêneos, atestando a confiabilidade do método para estas condições.

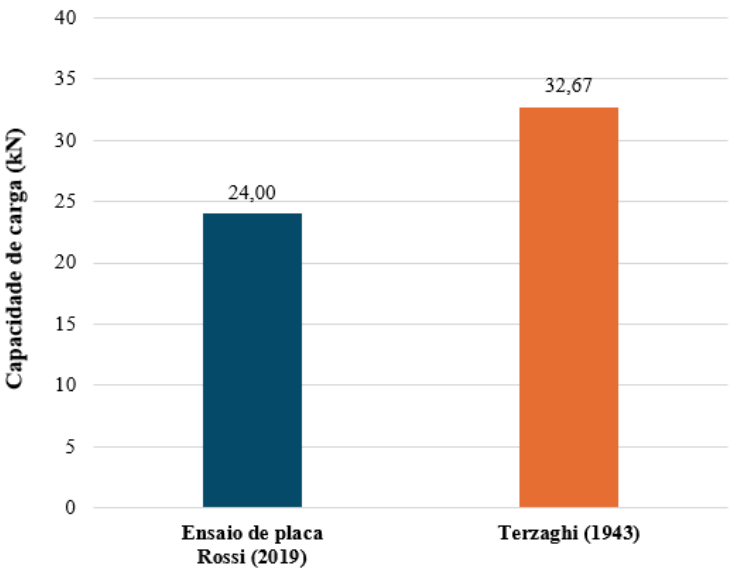


Figura 3. Comparação entre a previsão teórica e a prova de carga estática para a fundação sobre solo natural

A introdução da camada de solo-cimento promove uma alteração drástica no comportamento mecânico do sistema, fazendo com que os resultados experimentais de Rossi (2019) destoem significativamente do padrão homogêneo observado anteriormente no solo natural.

É importante ressaltar que, para fins de cálculo de ganho de suporte no sistema reforçado, Rossi (2019) realizou uma prova de carga de controle no solo natural contemporânea aos seus ensaios, obtendo uma carga de ruptura de 24 kN. Este valor difere dos dados históricos de Dalla Rosa et al. (2004a) devido a variações sazonais e de sucção do solo, sendo adotado como a base real para a quantificação do incremento de resistência gerado pelo cimento.

A Figura 4 ilustra o confronto entre os dados obtidos para análise do solo melhorado com cimento, desde a prova de carga experimental até as previsões teóricas citadas *a priori*, representadas como a simbologia CTn, onde CT significa Camada Tratada e n se refere à largura da placa.

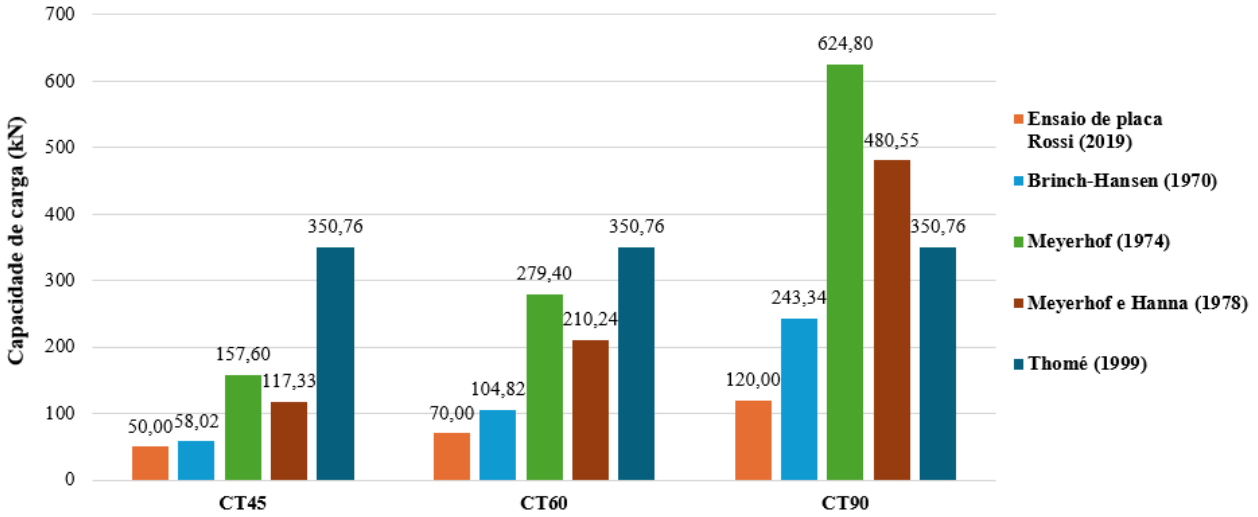


Figura 4. Comparação entre os métodos previsão de capacidade de carga e prova de carga estática para a fundação sobre solo melhorado

Dentre as metodologias avaliadas, a proposta de Brinch-Hansen demonstrou maior assertividade relativa ao comportamento real, apresentando erros menores para larguras reduzidas de reforço, com desvio mínimo de 16,04% para a camada de 45 cm e máximo de 102,78% para 90 cm. A acurácia deste método, que representa uma evolução das teorias de Meyerhof e Terzaghi, é corroborada pelo mecanismo de ruptura observado em campo que apresenta uma forma tronco-piramidal, condizente com as premissas teóricas de seus precursores.

Em contrapartida, o método de Thomé mostrou-se insensível ao aumento da largura da camada, revelando-se desfavorável para a otimização econômica do projeto, uma vez que não captura o ganho de resistência gerado pela maior área do reforço.

Ambos os métodos de Meyerhof apresentaram a maior divergência em relação à capacidade de carga experimental. É possível observar uma associação direta entre o erro e a geometria do reforço, pois os desvios tornaram-se mais acentuados à medida que as dimensões da camada aumentaram. A título do CT90 na Figura 4, a previsão estabeleceu um valor de 624,80 kN, valor cinco vezes superior aos 120 kN medidos em campo, o que representa um risco inaceitável ao dimensionamento. Afinal de contas, tal comportamento compromete a confiabilidade do método para o cenário estudado, exigindo a adoção de elevados fatores de segurança para viabilizar a sua aplicação prática.

Embora o tratamento do solo permita maior viabilidade econômica para projetos de solos mais complexos conforme Consoli et al. (2020) e Shah et al. (2025), os resultados indicam que nenhum dos métodos analíticos, em suas formas originais, é plenamente adequado para prever a resistência do solo-cimento. As formulações tendem a superestimar a capacidade de carga de forma perigosa, exigindo a aplicação de coeficientes de segurança superiores a 3,0 para viabilizar o uso prático dessas teorias.

Tomando como referência a prova de carga de controle realizada por Rossi (2019) no solo natural, que indicou uma ruptura inicial em 24 kN, o tratamento com 7% de cimento para a camada de 45 cm elevou a resistência para 50 kN, configurando um aumento de 108,3%. Este incremento de suporte é tecnicamente estratégico, pois permite o redimensionamento de sapatas com uma redução de área de até 50%.

A análise de consumo de cimento Portland (CP V-ARI) indica a viabilidade econômica da técnica: para a camada de 45 cm, seriam necessários apenas 13,3 kg de cimento (cerca de 1/4 de saco). Para as camadas de 60 cm e 90 cm, o consumo seria de 23,6 kg e 53,1 kg, respectivamente. Mesmo no cenário de

maior consumo, o custo tende a ser irrisório frente à economia gerada pela redução no consumo de concreto, armaduras e formas.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que o método que melhor previu a capacidade de carga foi o de Brinch – Hansen no qual foi considerado que uma camada de elevada capacidade de carga (solo-cimento) se apoiando sobre um solo de baixa capacidade de carga (solo argiloso natural), levando em consideração a profundidade, inclinação da carga, fatores de forma, inclinação do terreno, inclinação da base da fundação. Além disso este método se mostrou mais eficiente quanto menor a camada tratada, como ocorreu para a camada com largura de 45 cm (CL45E30), que foi o qual chegou mais próximo do valor do ensaio, e tendo seu valor superestimado na camada de maior largura (CL90E45).

Conclui-se também que essa metodologia de reforço na base de fundações com solo cimento, se mostrou eficaz em relação economia de materiais de construção, chegando a mais que duplicar a capacidade de carga como ocorreu no ensaio de placa com diâmetro de 30 cm, saindo de um valor de 24 KN (ensaio de placa) para 50KN (Rossi, 2019) que acarretaria numa fundação cerca de 50% menor com consequente diminuição na quantidade de concreto utilizado, de formas para concretagem, tempo de execução e armadura, isso com adição de somente 7% de cimento Portland CP V-ARI.

Porém destaca-se que os métodos de previsão de capacidade de carga estudados nessa pesquisa não foram eficientes em prever o comportamento das fundações assentes sobre solo melhorado, logo mais, pesquisas devem ser realizadas visando melhorar a capacidade de previsão de capacidade de carga de fundações superficiais assentes sobre solo cimentado. Desta forma, tornando a solução mais segura e economicamente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aksoy, H. S., & Kayaalp, D. K. (2025). Experimental Investigation of Lateral Stresses and Bearing Capacity of Sandy Soil Under Shallow Foundation Loads. *Applied Sciences*, 15(12), e6699.
Alsanabani, N. M., Al-Gahtani, K. S., Mahmoud, A. A. B., & Aljadhai, S. I. (2023). Integrated Methods for Selecting Construction Foundation Type Based on Using a Value Engineering Principle. *Sustainability*, 15(11), e8547.

Azhim, A., & Prakoso, W. A. (2019). Construction cost optimization of shallow foundation for sand soil in Indonesia. *MATEC Web of Conferences*, 270, e05005.

Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14, p. 1319 - 1342.

Brinch-Hansen, J. (1970). *A revised and extended formula for bearing capacity* (Bulletin No. 28). Danish Geotechnical Institute.

Buabbas, A. (2021). *Investigation of foundation failures* [Dissertação de mestrado, West Virginia University]. Research Repository @ WVU.

Carreta, M. S. (2018). *Comportamento de um solo residual levemente cimentado: Estimativa de capacidade de carga para estacas submetidas a esforços transversais* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Lume UFRGS.

Consoli, N. C., Moreira, E. B., Festugato, L., & Miguel, G. D. (2020). Spread footings bearing on circular and square cement-stabilized sand layers above weakly bonded residual soil. *Soils and Rocks*, 43(3), 339–349.

Cruz, R. C. (2008). *Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Lume UFRGS.

Dalla Rosa, F., Thomé, A., & Ruver, C. A. (2004a). Determinação de alguns parâmetros geotécnicos do campo experimental de geotecnia da Universidade de Passo Fundo - RS. In *Anais do 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos (Geo Jovem 2004)*. São Carlos, SP.

Dalla Rosa, F., & Thomé, A. (2004b). Obtenção das características de resistência e deformabilidade de um solo residual de basalto através de ensaios de placa. In *Anais das XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural*. Mendoza, Argentina.

Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2), 223–229.

Meyerhof, G. G., & Hanna, A. M. (1978). Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), 565–572.

Nawaz, M. M., Khan, S. R., Farooq, R., Nawaz, M. N., Khan, J., Tariq, M. A. U. R., Tufail, R. F., Farooq, D., & Ng, A. W. M. (2022). Development of a Cost-Based Design Model for Spread Footings in Cohesive Soils. *Sustainability*, 14(9), e5699.

Rossi, J. G. (2019). *Fundações circulares apoiadas em camadas de solo-cimento de área variável implantadas em solo coesivo-friccional de baixa capacidade de suporte* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Lume UFRGS.

Shah, J., Alam, M., Javed, F., Umar, M., & Ahmad, F. (2025). Comparative performance evaluation of machine learning models for predicting the ultimate bearing capacity of shallow foundations on granular soils. *Scientific Reports*, 15(1), e36525.
Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.

Thomé, A. (1999). *Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul].