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/COBRAMSEG2026.6/40

Estudo Laboratorial da Capacidade de Suporte Superficial de Solo Argiloso Reforçado com Geogrelhas

Luigi Tavares Gomes
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, goomes_8@hotmail.com

André Bagordakis Concatto
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, concattoandre@gmail.com

Angelo Dotto Ragagnin Prior
Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, angelodrprior@hotmail.com

Patrícia Rodrigues Falcão
Doutoranda, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, falcao.rodrigues.patricia@gmail.com

Magnos Baroni
Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@ufsm.br

RESUMO: Este trabalho apresenta resultados de um estudo experimental em escala reduzida conduzido para avaliar o aumento da capacidade de suporte de fundações superficiais sobre solo argiloso reforçado com geogrelhas. Os ensaios foram realizados em modelos físicos construídos em caixa rígida com dimensões de 1,0 × 1,0 × 0,45 m, por meio de provas de carga utilizando placas circulares de 15 cm e 30 cm de diâmetro. Foram avaliados oito modelos experimentais, comparando o comportamento do solo argiloso reconstituído sem reforço com duas estratégias de melhoria: (i) utilização de uma camada de areia compactada de 7,5 cm como elemento de redistribuição de tensões e (ii) associação dessa camada com geogrelhas de diferentes resistências nominais à tração (110, 200 e 400 kN/m). A interpretação das curvas tensão–recalque foi realizada por meio de regressão linear segmentada para determinação da tensão de inflexão e pelo método de extrapolação proposto por Aoki para estimativa da tensão de ruptura. A eficiência do reforço foi avaliada por meio da Relação da Capacidade de Suporte. Os resultados indicaram que a utilização apenas da camada de areia apresentou valores de aumento de capacidade de carga próximos de 1,1, enquanto os modelos reforçados com geogrelhas apresentaram ganhos mais expressivos, com valores de até aproximadamente 1,60 para a tensão de inflexão e 1,67 para a tensão de ruptura. Observou-se ainda que o desempenho do sistema é fortemente influenciado pela relação entre o comprimento do reforço e a largura da fundação. Para menores relações, verificou-se limitação na mobilização da resistência das geogrelhas mais rígidas, associada a condições de ancoragem insuficientes.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Físico, Geossintético, Prova de Carga; Regressão Linear, Extrapolação.

ABSTRACT: This study presents the results of a reduced-scale experimental investigation to evaluate the improvement in bearing capacity of shallow foundations on clayey soil reinforced with geogrids. The tests were performed using physical models built in a rigid box with internal dimensions of 1.0 × 1.0 × 0.45 m, through plate load tests employing circular plates with diameters of 15 cm and 30 cm. Eight experimental models were evaluated, comparing the behavior of reconstituted clayey soil without reinforcement with two improvement strategies: (i) a 7.5 cm thick compacted sand layer acting as a stress distribution layer, and (ii) its combination with geogrids of different nominal tensile strengths (110, 200, and 400 kN/m). The stress–settlement curves were interpreted using segmented linear regression to determine the inflection stress, and the extrapolation method proposed by Aoki to estimate the ultimate bearing capacity. Reinforcement efficiency was evaluated using the Bearing Capacity Ratio (BCR). The results showed that the sand layer alone led to BCR values close to 1.1, whereas the geogrid-reinforced models achieved higher improvements, reaching approximately 1.60 for the inflection stress and 1.67 for the ultimate bearing capacity. The system performance was strongly influenced by the ratio between reinforcement length and foundation width. For lower ratios, limited mobilization of geogrid tensile strength was observed due to insufficient anchorage.

KEYWORDS Physical Model, Geosynthetic, Plate Load Test, Linear Regression, Extrapolation.

1 INTRODUÇÃO

As fundações superficiais são amplamente utilizadas em obras de engenharia civil para transmitir ao solo as cargas provenientes das estruturas. O desempenho dessas fundações depende diretamente das propriedades mecânicas do solo de suporte, especialmente de sua resistência ao cisalhamento e deformabilidade. Em solos argilosos ou compressíveis, a baixa capacidade de suporte e a ocorrência de recalques excessivos podem comprometer a estabilidade e a funcionalidade das estruturas, tornando necessária a adoção de técnicas de melhoria do terreno (TERZAGHI, 1943; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2023).

Entretanto, em diversas situações de engenharia, o solo de fundação apresenta baixa capacidade de suporte e elevada deformabilidade, o que pode resultar em recalques excessivos ou mesmo em mecanismos de ruptura. Nessas condições, técnicas de melhoria de solo tornam-se necessárias para garantir o desempenho adequado das fundações. Entre as alternativas disponíveis destacam-se a substituição de solo, a estabilização química e o uso de materiais granulares compactados. Contudo, tais soluções podem apresentar limitações associadas a custos, prazos executivos ou restrições construtivas, o que tem incentivado o desenvolvimento de técnicas alternativas baseadas no uso de geossintéticos (MITTAL, 2014).

A inclusão de geogrelhas no maciço de fundação promove a redistribuição de tensões e permite a mobilização de esforços de tração no reforço, contribuindo para o aumento da capacidade de carga e para a redução de recalques. Estudos pioneiros conduzidos por Binquet e Lee (1975) demonstraram que a presença de reforços horizontais pode aumentar significativamente a capacidade de suporte de fundações superficiais, introduzindo o conceito de Bearing Capacity Ratio (BCR), definido como a razão entre a capacidade de carga do solo reforçado e a do solo não reforçado. Estudos experimentais e numéricos demonstram que o reforço com geogrelhas pode produzir incrementos significativos na capacidade de suporte e modificações importantes na resposta tensão–recalque do sistema solo–fundação (HELIS et al., 2023; HOU et al., 2023).

Diversos fatores influenciam o desempenho de fundações superficiais reforçadas com geossintéticos, incluindo o número de camadas de reforço, a profundidade de instalação, o espaçamento entre camadas e as propriedades mecânicas do material utilizado. Entre esses parâmetros, destaca-se a relação adimensional entre o comprimento do reforço (L) e a largura da área carregada (B), expressa por L/B, que representa o grau de ancoragem do reforço em relação à zona de influência das tensões (FRAGASZY; LAWTON, 1984; PALMEIRA, 2018).

Pesquisas recentes têm buscado compreender de forma mais detalhada os mecanismos de interação entre solo e geogrelha e sua influência no desempenho de fundações reforçadas. Resultados experimentais indicam que configurações adequadas de reforço podem elevar a capacidade de suporte em mais de 60% e reduzir significativamente os recalques do sistema, evidenciando o potencial dessa técnica para aplicação em solos de baixa resistência (Tawfeeq & Salih, 2025). Além disso, estudos experimentais e numéricos recentes também destacam a importância da geometria do reforço e da profundidade de instalação para a mobilização eficiente da resistência à tração da geogrelha e para a modificação do mecanismo de ruptura do solo (Wu et al., 2024).

Apesar do avanço das pesquisas na área, ainda existem lacunas relacionadas à interação entre propriedades do reforço e parâmetros geométricos do sistema, especialmente em relação ao papel da rigidez da geogrelha e da relação L/B no comportamento tensão–recalque de fundações superficiais reforçadas.

Nesse contexto, o presente trabalho investiga experimentalmente o comportamento de fundações superficiais reforçadas com geogrelhas instaladas em camada intermediária de areia compactada sobre solo argiloso reconstituído com índices naturais de campo. Foram realizados ensaios de prova de carga em modelos físicos, avaliando diferentes resistências nominais à tração do reforço e distintas relações L/B, obtidas por meio da variação do diâmetro das placas de carregamento. A análise concentrou-se na influência desses parâmetros na capacidade de suporte do sistema e na rigidez do conjunto solo–reforço, por meio da interpretação das curvas tensão–recalque e da determinação da Relação da Capacidade de Suporte (BCR).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Como material de fundação foi empregado um solo argiloso laterítico proveniente do município de Cruz Alta, no estado do Rio Grande do Sul. Esse material foi previamente caracterizado por Falcão (2021), que realizou a determinação dos índices físicos e parâmetros geotécnicos representativos do solo em condições

naturais de campo. Como material de preenchimento da camada de transferência de tensões foi utilizada uma areia fina a média, caracterizada por Gomes (2025).

A Tabela 1 apresenta os principais índices físicos do solo, incluindo os valores médios obtidos em campo e suas respectivas faixas de variação. Esses parâmetros foram utilizados como referência para a reconstituição das camadas de solo nos modelos físicos, de modo a reproduzir condições representativas de campo. Adicionalmente, apresenta-se nessa os parâmetros de caracterização da areia utilizada.

Tabela 1. Índices físicos, granulometria e parâmetros de resistência do solo de fundação e da areia utilizada.

Propriedade	Parâmetro	Valor médio	
		Solo argiloso	Areia fina a média
Índices físicos	Massa específica real dos grãos - γ_s (g/cm³)	2.75	2.6
	Massa específica aparente natural - γ_n (g/cm³)	1.526	1.65
	Teor de umidade natural -*w* (%)	31.81	8
	Índice de vazios - e_0	1.41	0.7
Granulometria	% argila	65	0
	% silte	16	0
	% areia	19	100
Parâmetros de resistência	Intercepto coesivo - c' (kPa)	9.75	0
	Ângulo de atrito interno - ϕ' (º)	28	37

Nota: Para o solo argiloso, os valores médios apresentados correspondem às condições de campo reportadas por Falcão (2021). Os desvios padrão dos índices físicos são: γn = 0,099 g/cm³, w = 7,2 % e e₀ = 0,15.

O reforço foi constituído por geogrelhas poliméricas da mesma família Fortrac, apresentando geometria de malha semelhante, porém diferentes resistências nominais à tração. Foram utilizadas três geogrelhas com resistências nominais de 110 kN/m, 200 kN/m e 400 kN/m, permitindo avaliar a influência da rigidez do reforço no desempenho das fundações superficiais reforçadas.

2.2 Modelos experimentais e procedimento de ensaio

Os ensaios foram realizados em modelos físicos reduzidos construídos em uma caixa rígida com dimensões internas de 1,0 m × 1,0 m × 0,45 m. O solo de fundação foi disposto em camadas sucessivas e compactado de modo a reproduzir os índices físicos representativos observados em campo.

Foram avaliados oito modelos experimentais distintos. O primeiro modelo corresponde ao solo natural reconstituído, utilizado como referência para comparação. No segundo modelo foi introduzida uma camada de areia compactada com espessura de 7,5 cm, posicionada imediatamente abaixo da placa de carregamento, atuando como elemento de redistribuição de tensões.

Nos demais modelos foi utilizada a associação entre a camada de areia compactada e uma camada de geogrelha instalada no interior dessa camada granular. Foram empregadas as três geogrelhas com diferentes resistências nominais à tração. A Figura 1 apresenta as configurações dos modelos físicos executados.

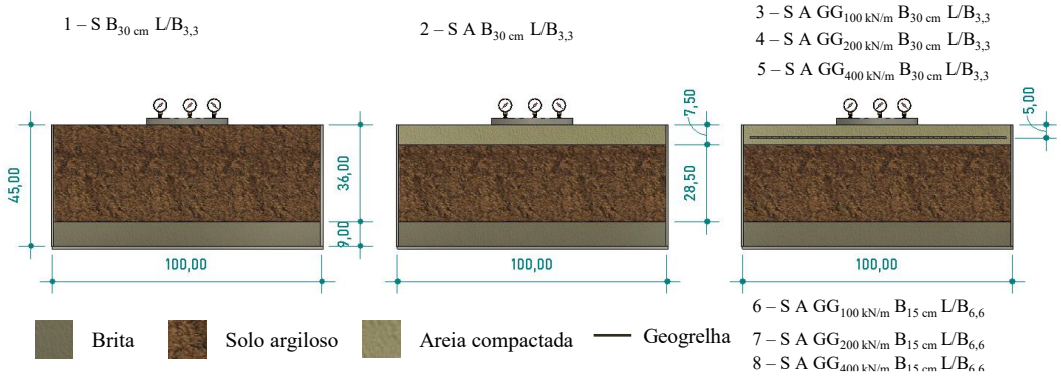


Figura 1. Configuração dos modelos físicos utilizados nos ensaios de prova de carga.

A influência da relação entre o comprimento do reforço (L) e a largura da área carregada (B) foi avaliada por meio da utilização de placas circulares de carregamento com diâmetros de 15 cm e 30 cm.

Os ensaios de prova de carga superficial foram realizados seguindo os preceitos estabelecidos na NBR 6489, adotando a metodologia de carregamento rápido. As leituras de recalque foram obtidas por meio de

extensômetros posicionados sobre a placa de carregamento, permitindo a obtenção das curvas tensão–recalque para cada modelo.

2.3 Interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados baseou-se na análise das curvas tensão–recalque obtidas nos ensaios de prova de carga.

Inicialmente, foi aplicado o método de regressão segmentada (Eq. 1) para identificar o ponto de inflexão das curvas, correspondente à tensão característica associada à transição entre o comportamento predominantemente elástico e o início do processo de plastificação do solo. Esse ponto foi adotado como a tensão de inflexão (σ_ψ).

$$\rho=\beta_0+\beta_1\cdot\sigma+\Delta\beta\cdot(\sigma-\sigma_\psi)_+ \quad (1)$$

onde ρ representa o recalque, σ é a tensão aplicada (kPa), β_0 é o intercepto, β_1 corresponde à inclinação da reta no trecho anterior à tensão de inflexão, $\Delta\beta$ representa a variação da inclinação após esse ponto e ψ corresponde à tensão de inflexão da curva. O termo $(\sigma-\sigma\psi)_+$ assume valor nulo para $\sigma \leq \sigma_\psi$.

Para estimativa da tensão de ruptura (σ_{rup}), foi aplicado o método de extrapolação proposto por Aoki (1976), apresentado na Equação 2. Esse procedimento consiste no ajuste de uma função matemática aos dados experimentais, permitindo a extrapolação da curva tensão–recalque até a condição de ruptura.

$$\sigma = \sigma_{rup.} \cdot (1 - e^{-(a\rho+b)}) \quad (2)$$

sendo a e b parâmetros de ajuste do modelo de regressão.

Com base nesses parâmetros, foi calculada a Relação da Capacidade de Suporte (*Bearing Capacity Ratio* – BCR), definida como a razão entre a tensão característica do solo reforçado e a tensão correspondente obtida no modelo de referência sem reforço.

3 RESULTADOS

3.1 Parâmetros dos modelos construídos por camadas reconstituídas

A Figura 2 apresenta os valores de peso específico natural (γ_n), teor de umidade (w) e índice de vazios (e) obtidos nas camadas reconstituídas durante a construção dos modelos experimentais.

Observa-se que os valores determinados nos modelos apresentam boa consistência entre as camadas e se mantêm compatíveis com aqueles observados para o solo em campo, apresentados na Seção 2.1. De modo geral, os índices físicos obtidos indicam que o procedimento de reconstituição adotado permitiu reproduzir satisfatoriamente os índices encontrados em campo.

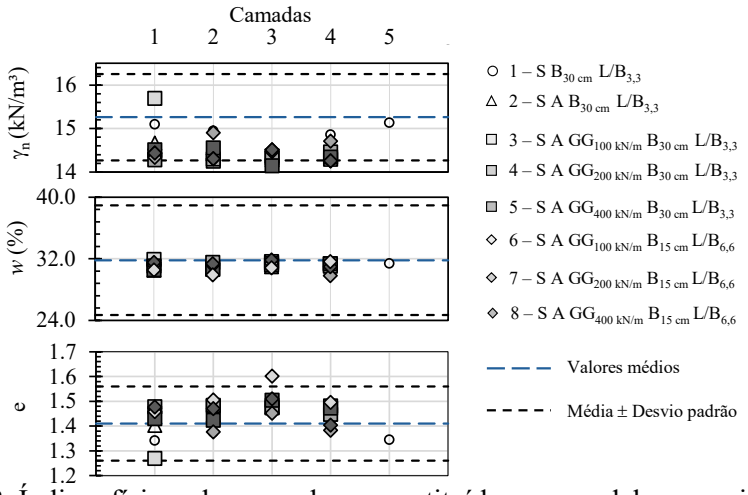


Figura 2. Índices físicos das camadas reconstituídas nos modelos experimentais.

3.2 Curvas tensão-recalque e definição das tensões características

A Figura 3 apresenta as curvas tensão–recalque obtidas para os oito modelos avaliados. Além dos dados experimentais, são apresentadas as curvas ajustadas por meio do modelo de regressão segmentada e do modelo de extrapolação utilizados para estimar as tensões características dos ensaios, correspondentes à tensão de inflexão (σ_{ψ}) e à tensão de ruptura (σ_{rup}).

De modo geral, ambos os modelos apresentaram adequados ajustes aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,943 e 0,999, indicando elevada confiabilidade na representação do comportamento observado nos ensaios. A regressão segmentada mostrou-se adequada para identificar a transição entre o regime predominantemente elástico e o início do processo de plastificação do solo, enquanto o modelo de extrapolação permitiu estimar de forma consistente a tensão de ruptura associada ao mecanismo de colapso progressivo.

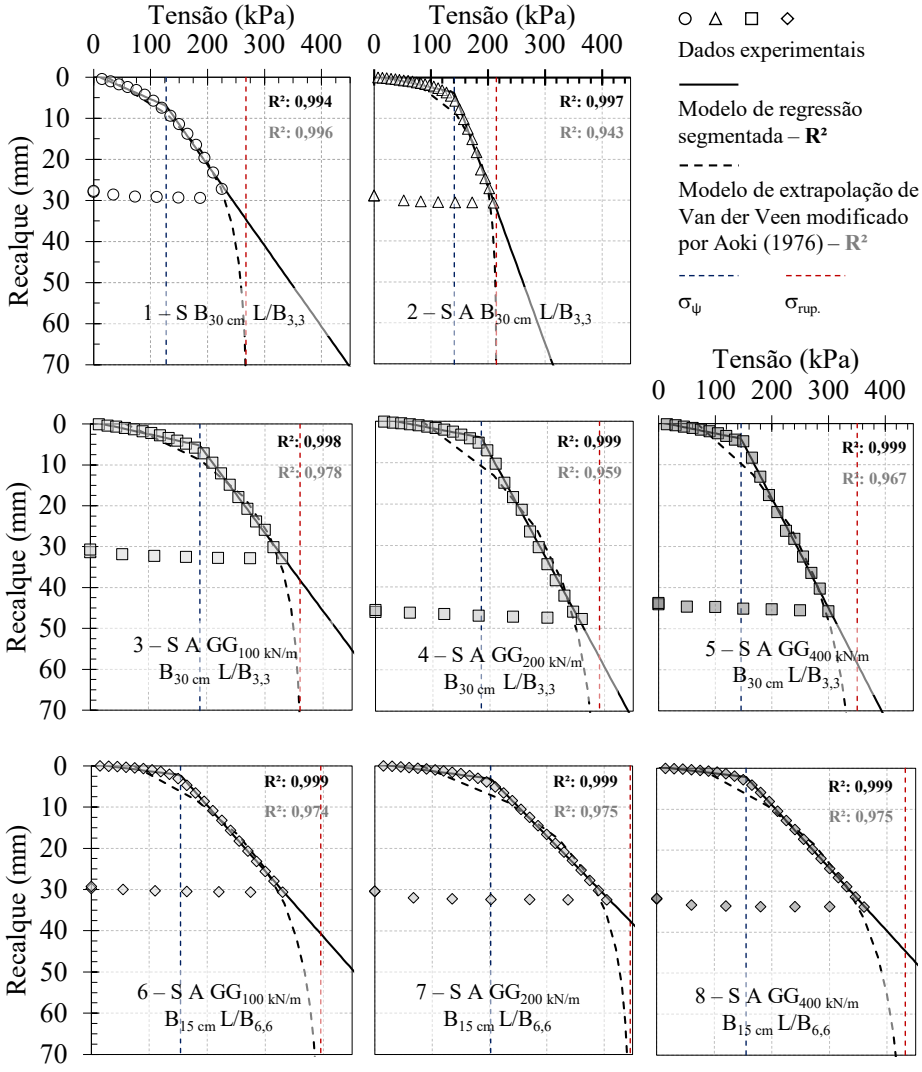


Figura 3. Curvas tensão–recalque dos modelos avaliados com ajustes por regressão segmentada e modelo de extrapolação para estimativa das tensões características.

O modelo de referência, correspondente ao solo sem reforço, apresentou tensão de inflexão de aproximadamente 127 kPa e tensão de ruptura de 268 kPa. A introdução da camada de areia compactada promoveu aumento da rigidez inicial do sistema, resultando em incremento da tensão de inflexão da ordem de 10%. Entretanto, a tensão de ruptura obtida para essa condição foi inferior à do solo natural, indicando

mudança no mecanismo de ruptura do sistema. Sendo para esse modelo, desenvolvido o mecanismo de ruptura geral, proporcionado pela elevada rigidez incrementada ao sistema pela adição da camada de areia compactada.

Para os modelos reforçados com a associação entre camada de areia e geogrelhas, observam-se aumentos expressivos nas tensões características. Os valores de tensão de inflexão variaram entre 146 e 202 kPa, correspondendo a incrementos entre 15% e 59% em relação ao modelo de referência. Já as tensões de ruptura variaram entre 350 e 445 kPa, representando aumentos de até 67%. Além do aumento das tensões mobilizadas, observa-se também alteração na forma das curvas tensão–recalque, com maior rigidez no trecho inicial e transição mais gradual para o regime plástico, indicando a atuação do reforço na redistribuição das tensões e na restrição das deformações do solo.

3.3 Influência do reforço na capacidade de suporte (BCR)

A Figura 4 apresenta os valores da Relação da Capacidade de Suporte para os diferentes modelos avaliados, considerando tanto a tensão de inflexão quanto a tensão de ruptura, sempre em relação ao modelo de referência sem reforço.

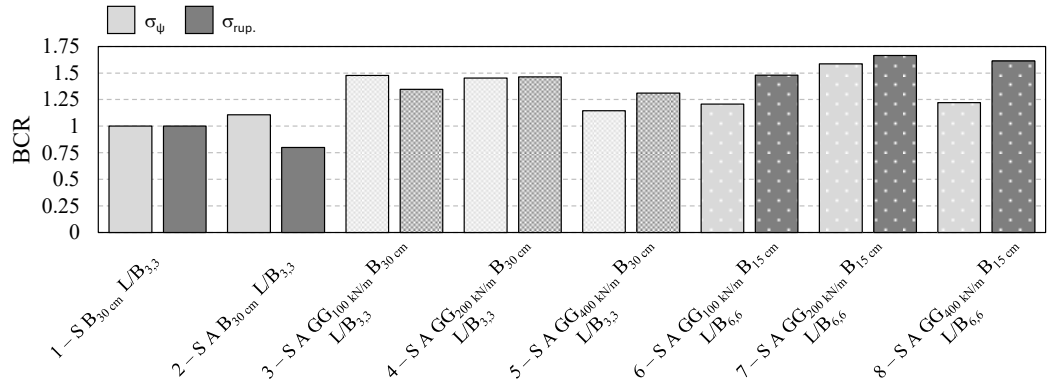


Figura 4. Relação da capacidade de suporte (BCR) dos modelos reforçados em relação ao solo de referência, considerando as tensões de inflexão e de ruptura.

Observa-se inicialmente que a simples introdução da camada de areia compactada resultou em valores de tensão de inflexão superiores ao modelo de referência, indicando aumento da rigidez inicial do sistema da ordem de 10%. Entretanto, para a tensão de ruptura, os valores obtidos foram inferiores aos do solo natural. Esse comportamento pode ser associado ao desenvolvimento de um mecanismo de ruptura generalizada, caracterizado por elevada rigidez para pequenas deformações, seguida por rápida redução da rigidez no trecho de plastificação.

Para os modelos reforçados com geogrelhas, os ganhos de capacidade de suporte foram significativamente maiores, atingindo valores de BCR de até 1,60 para a tensão de inflexão e 1,67 para a tensão de ruptura, observados no Modelo 7.

Outro aspecto relevante refere-se aos modelos ensaiados com placa de B = 30 cm. Nesses casos, observa-se que os valores de BCR apresentam tendência inversamente proporcional à rigidez das geogrelhas, de modo que reforços com menor resistência nominal apresentaram ganhos relativamente maiores de capacidade de suporte. Esse comportamento pode ser associado às condições de ancoragem do reforço. Para placas de maior diâmetro, a relação entre o comprimento do reforço e a largura da fundação (L/B) torna-se menor, reduzindo a extensão da zona de ancoragem disponível para mobilização da resistência à tração da geogrelha. Nessas condições, reforços mais rígidos exigem maiores deslocamentos para mobilizar plenamente sua resistência.

Quando foram utilizadas placas com diâmetro de 15 cm, aumentando-se consequentemente a relação L/B, observou-se alteração nesse comportamento. O maior comprimento relativo de ancoragem favoreceu a

interação solo–reforço e permitiu maior mobilização da resistência das geogrelhas. Ainda assim, nos níveis de deformação associados à tensão de inflexão, os ganhos de BCR decorrentes do aumento da rigidez do reforço permanecem limitados, indicando que a mobilização completa da resistência à tração ocorre apenas para níveis de deformação mais elevados.

3.4 Rigidez inicial do sistema solo-reforço

A influência da rigidez do reforço e da geometria do sistema pode ser analisada de forma mais clara a partir da Figura 5, que apresenta a relação entre a tensão de inflexão e o recalque correspondente para cada modelo ensaiado.

Observa-se que os modelos reforçados mobilizam tensões mais elevadas para níveis equivalentes de recalque quando comparados ao solo sem reforço, indicando aumento da rigidez inicial do sistema solo–fundação. Em média, a rigidez inicial dos modelos reforçados foi aproximadamente 1,5 vezes maior que a observada no modelo de referência para os ensaios realizados com placa de 30 cm, atingindo valores maiores a 2,0 vezes para os modelos ensaiados com placa de 15 cm.

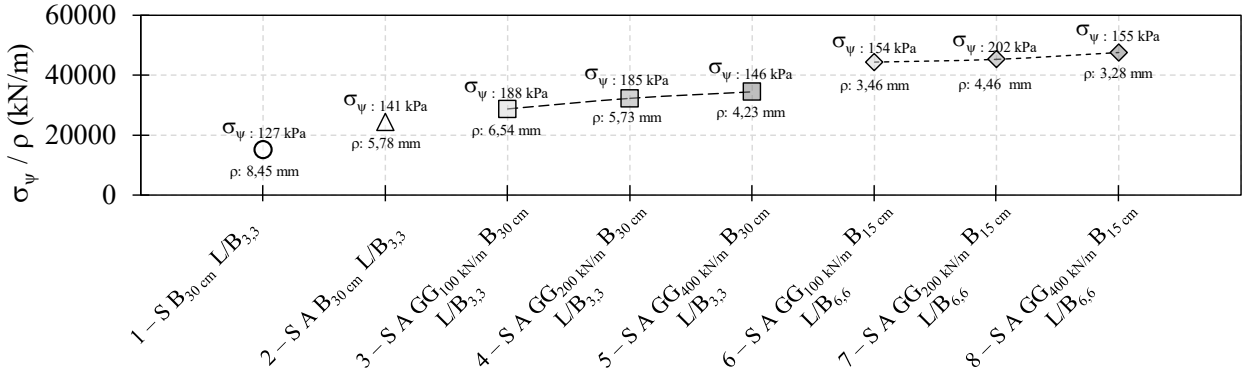


Figura 5. Relação entre a tensão de inflexão (σ_ψ) e o recalque correspondente para os modelos ensaiados.

Além disso, verifica-se que tanto o aumento da rigidez da geogrelha quanto o aumento da relação L/B contribuem para o incremento da rigidez inicial do sistema. Relações L/B mais elevadas favorecem o desenvolvimento de uma zona de ancoragem mais extensa, permitindo mobilização mais eficiente da resistência à tração do reforço e maior interação entre o solo, a camada de areia e a geogrelha.

De forma geral, os resultados indicam que o desempenho de fundações superficiais reforçadas depende não apenas da rigidez do geossintético, mas também das condições geométricas do sistema, particularmente da relação L/B, que controla o grau de mobilização da resistência do reforço.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo experimental em escala reduzida com o objetivo de avaliar a influência da utilização de uma camada de areia compactada e da inserção de geogrelhas no desempenho de fundações superficiais sobre um solo argiloso reconstituído. De modo geral, os procedimentos adotados para a reconstituição das camadas permitiram reproduzir de forma satisfatória as condições físicas representativas do solo em campo, garantindo condições consistentes para a avaliação do comportamento dos diferentes modelos analisados.

Os resultados experimentais indicaram que a introdução da camada de areia compactada altera o comportamento tensão–recalque do sistema solo–fundação, promovendo aumento da rigidez inicial do conjunto. Quando associada à utilização de geogrelhas, observou-se melhora significativa no desempenho do sistema, evidenciando a contribuição do reforço na redistribuição das tensões aplicadas e na restrição das deformações do solo.

Verificou-se ainda que o desempenho das fundações reforçadas não depende exclusivamente da rigidez do geossintético, mas também das condições geométricas do sistema. Em particular, a relação entre o comprimento do reforço e a largura da fundação (L/B) mostrou-se um parâmetro determinante para a mobilização efetiva da resistência à tração das geogrelhas. Modelos com menores relações L/B apresentaram limitações na mobilização do reforço, enquanto o aumento dessa relação favoreceu o desenvolvimento de uma zona de ancoragem mais eficiente e, consequentemente, maiores ganhos de capacidade de suporte.

Por outro lado, observou-se que geogrelhas com maior rigidez tendem a proporcionar maior rigidez inicial ao sistema solo–fundação, resultando em menores deformações para níveis de carregamento associados às condições de serviço. Dessa forma, os resultados evidenciam que a eficiência do reforço em fundações superficiais depende da combinação entre a rigidez do geossintético e as condições de ancoragem do sistema, sendo a relação L/B um parâmetro fundamental para a mobilização efetiva da resistência do reforço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por todo o apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6489. *Solo – Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro.

Binquet, J., Lee, K. L. (1975) Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101 (GT12), p. 1241–1255.

Camapum de Carvalho, J., Gitirana Junior, G. F. N., Machado, S. L., Mascarenha, M. M. A., Silva Filho, F. C., Rodrigues, R. A. (orgs.) (2023). Solos não saturados no contexto geotécnico. 2ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS.

Falcão, P. (2021). Avaliação do impacto da inundação na resistência e deformabilidade de um solo laterítico e colapsível: estudo experimental e numérico. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS.

Fragaszy, R. J., Lawton, E. (1984) Bearing capacity of reinforced sand subgrades. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110 (10), p. 1500–1507.

Gomes, L. T. (2025). Mitigação do potencial de colapso em solos lateríticos por meio de reforço com geogrelhas. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS.

Helis, R., Mansouri, T., Abbeche, K. (2023) Behavior of a circular footing resting on sand reinforced with geogrid and grid anchors. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13 (1), p. 10216–10222.

Hou, J., Wang, Y., Zhang, Z., Li, C. (2023) Bearing capacity and mechanism of H–V geogrid reinforced foundations. *Polymers*, 15 (12), p. 2606.

Mittal, S. (2014) *An Introduction to Ground Improvement Engineering*. Scientific International Pvt. Ltd., New Delhi.

Palmeira, E. M. (2018) *Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente*. Oficina de Textos, São Paulo.

Tawfeeq, R. S., Salih, B. M. M. (2025) Advanced geogrid reinforcement strategies for improving bearing capacity and settlement control in shallow foundations. *Civil Engineering Journal*, 11 (2).

Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.

Wu, J., Liu, H., Zhang, Y. (2024) Bearing capacity and reinforcement mechanisms of horizontal–vertical geogrid in reinforced foundations. *Buildings*, 14 (6).