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/COBRAMSEG2026.5/16

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO RESIDUAL ARGILOSO ARTIFICIALMENTE CIMENTADO SUBMETIDO A ESFORÇOS DE ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES

Guilherme Irineu Venson
Professor/Pesquisador, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, guilhermeivenson@hotmail.com

Giordan Pedro Menegarde Correa
Graduado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, giordanpedro@gmail.com

João Augusto Brand Brandalize.
Engenheiro Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, j4brandalize@gmail.com

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de fundações superficiais assentadas sobre um sistema de dupla camada, utilizando o solo residual de Cascavel, Paraná, reforçado com solo-cimento. A pesquisa avaliou a influência da porosidade e do teor volumétrico de cimento na capacidade de carga e no coeficiente de recalque do compósito. A metodologia consistiu na caracterização física do solo e na realização de provas de carga em um modelo físico em escala reduzida. Foram ensaiadas camadas de reforço com teores de cimento de 0%, 0,5%, 2,0% e 8,0% e massas específicas aparentes secas de 1,09 g/cm³ e 1,30 g/cm³. Os resultados indicaram dois modos distintos de falha: puncionamento para o solo natural e ruptura por fissuração para as camadas cimentadas. Constatou-se que o aumento do grau de compactação e a adição do aglomerante elevaram a resistência do sistema. Por fim, a razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento demonstrou ser um parâmetro eficaz para avaliar o coeficiente de recalque, possibilitando a criação de correlações matemáticas com ensaios de compressão simples para otimizar projetos de fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cimento, Fundações Superficiais, Modelo Reduzido, Coeficiente de Recalque, Melhoramento de Solos.

ABSTRACT: This study aimed to analyze the mechanical behavior of shallow foundations resting on a double-layer system, using the residual soil from Cascavel, Paraná, reinforced with soil-cement. The research evaluated the influence of porosity and volumetric cement content on the bearing capacity and settlement coefficient of the composite. The methodology consisted of the physical characterization of the soil and the execution of load tests on a reduced-scale physical model. Reinforcement layers with cement contents of 0%, 0.5%, 2.0%, and 8.0% and dry apparent specific weights of 1.09 g/cm³ and 1.30 g/cm³ were tested. The results indicated two distinct failure modes: punching shear for the natural soil and cracking failure for the cemented layers. It was found that increasing the degree of compaction and adding the binder significantly increased the system's resistance. Finally, the ratio between porosity and volumetric cement content proved to be an effective parameter for evaluating the settlement coefficient, enabling the creation of mathematical correlations with simple compression tests to optimize foundation projects.

KEYWORDS: Soil-cement, Shallow Foundations, Reduced Model, Settlement Coefficient, Soil Improvement.

1 Introdução

Na Engenharia Civil, a ocorrência de solos com baixa capacidade de suporte em camadas superficiais é comum, o que frequentemente exige a execução de fundações profundas, de custo mais elevado. Na cidade de Cascavel, Paraná, o solo residual predominante possui características argilosas e lateríticas, apresentando, muitas vezes, baixa resistência mecânica em seu estado natural não compactado. Uma alternativa viável para possibilitar o uso de fundações superficiais, técnica de menor custo e maior simplicidade construtiva, é o emprego de camadas de reforço em solo-cimento. Esse compósito proporciona um ganho significativo de resistência e rigidez, além de oferecer vantagens ambientais ao utilizar o solo local como matéria-prima.
Nesse contexto, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento das técnicas de melhoramento de solos, analisando o comportamento mecânico de fundações superficiais assentadas sobre um sistema de dupla camada, sendo a superior reforçada com solo-cimento. A pesquisa busca avaliar a influência do teor volumétrico de cimento adicionado ao solo de Cascavel no aumento da capacidade de carga do sistema, por meio da construção de um modelo físico em escala reduzida. Para isso, investiga-se a validade do uso da razão porosidade/teor volumétrico de cimento na estimativa da tensão de ruptura e a relação entre o teor de cimentação e o coeficiente de recalque, quantificando a influência isolada dessas variáveis no desempenho da fundação.

2 Metodologia

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos empregados na condução da pesquisa, detalhando o processo para possibilitar a compreensão e a replicação do estudo em investigações futuras. O programa experimental dividiu-se na caracterização física do solo em análise e na execução de ensaios especiais, que consistiram em provas de carga em modelo físico reduzido.

2.1 Programa experimental e materiais

Para os ensaios de prova de carga, foram especificados dois valores distintos de massa específica aparente seca (γ_d) iguais a 1,09 e 1,30 g/cm³, e quatro teores de cimento em relação ao volume de solo seco: 0%, 0,5%, 2,0% e 8,0%. Adotou-se uma única umidade de moldagem de 33% e um tempo de cura das amostras cimentadas de 7 dias. Ao todo, foram moldadas e ensaiadas 8 configurações diferentes de camadas de reforço.

O solo utilizado é proveniente do campus da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em Cascavel. Trata-se de um solo classificado como A-7 pela classificação HRB (Highway Research Board) e como CH pelo Sistema Unificado (Unified Soil Classification System), caracterizando-se como fino, de elevada compressibilidade e frequentemente associado a casos de baixa capacidade de suporte. O solo foi coletado, destorroado na peneira de 9,5 mm e armazenado em tonéis para preservar sua umidade natural.

O agente cimentante escolhido foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V ARI). A escolha justificou-se pelo acelerado ganho de resistência inicial desse aglomerante, o que viabilizou o tempo de cura reduzido de 7 dias para as misturas solo-cimento sem comprometer as análises de capacidade de carga.

2.2 Ensaios de caracterização física

A determinação da umidade seguiu a NBR 6457/86. O ensaio de granulometria foi realizado por peneiramento fino e sedimentação (NBR 7181/84), utilizando solução defloculante e leituras de densímetro em intervalos cronometrados de até 24 horas.

A massa específica dos grãos foi determinada com o auxílio de picnômetros e água destilada, conforme a NBR 6457/86. Para os limites de consistência, o limite de liquidez (LL) foi obtido pelo método do aparelho de Casagrande (NBR 6459/84), traçando-se a curva do número de golpes em função da umidade. O limite de plasticidade (LP) foi determinado pela técnica de moldagem de cilindros de 3 mm de diâmetro (NBR 7180/16).

2.3 Prova de carga em modelo em escala reduzida

A aplicação da técnica de reforço com solo-cimento em fundações superficiais visa evitar grandes volumes de escavação. Para simular essa condição e executar as provas de carga em modelo reduzido, projetou-se um aparato composto por estrutura metálica de suporte, tanque de solos, sistema de aplicação de carga e relógios comparadores para medição de deslocamentos. O arranjo geométrico das variáveis de ensaio é detalhado na Figura 1.

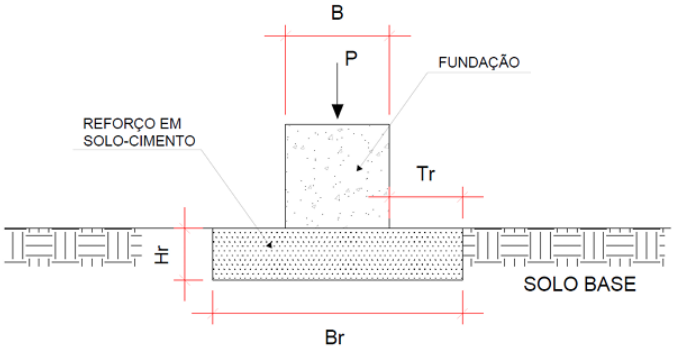


Figura 1. Esquema de prova de carga em modelo reduzido.

O modelo de fundação superficial do tipo sapata corrida foi confeccionado em madeira rígida para não sofrer deformações sob as tensões aplicadas, em função da menor dimensão da sapata (B=5cm). Para conter o maciço de solo simulando o semi-espaço infinito, de forma a evitar a interferência das bordas nos bulbos de tensão, construiu-se um tanque de contenção em madeira. O tanque foi impermeabilizado internamente para evitar a absorção da água do solo e projetado com dimensões internas de 30 cm de profundidade (6B), 35 cm de comprimento (7B) e 25 cm de largura (5B). A face frontal foi concebida de forma removível para permitir o registro fotográfico do padrão de fissuração após os ensaios.

2.4 Moldagem das camadas de reforço e preenchimento do tanque

As camadas de reforço foram moldadas externamente ao tanque em moldes de compensado naval, com dimensões internas de 10 x 25 x 2,5 cm e marcações para garantir a espessura de projeto do reforço (H_r) de 2,5 cm (0,5B), o qual por sua vez possuía um comprimento (Br) de 10cm (2B) e largura igual à da caixa de 5B. A mistura homogênea de solo (na umidade de 33%) e cimento foi compactada em camada única utilizando uma prensa manual sobre o molde revestido com plástico. Após a moldagem, as amostras foram embaladas hermeticamente e submetidas ao período de cura de 7 dias.

O maciço de solo de fundação foi montado e compactado dentro do tanque antes de cada ensaio específico, garantindo a massa específica γ_d = 1,09 g/cm³. O preenchimento ocorreu em quatro camadas inferiores de 5 cm de espessura cada, compactadas com o auxílio de um soquete cilíndrico. Para assegurar a aderência e a homogeneidade do maciço, a superfície de cada camada era vigorosamente escarificada antes do lançamento do material da camada subsequente.

Após os 20 cm iniciais, compactou-se uma camada adicional de 2,5 cm, cujo centro foi rigorosamente nivelado para receber a placa de reforço em solo-cimento curada. As laterais da placa de reforço foram então preenchidas com solo e compactadas, de forma que todo o sistema ficasse perfeitamente nivelado no topo do tanque.

2.5 Procedimentos de ensaio e instrumentação

Com o tanque finalizado, o modelo reduzido de fundação foi posicionado no centro exato da camada de reforço, utilizando marcações de alinhamento longitudinal. O sistema de aplicação de carga consistiu em um macaco hidráulico de acionamento manual, conectado a uma célula de carga que enviava os dados para um precursor digital. A instrumentação de recalque contou com dois relógios comparadores posicionados simetricamente sobre o modelo de fundação. O aparato completamente instrumentado é ilustrado na Figura 2.

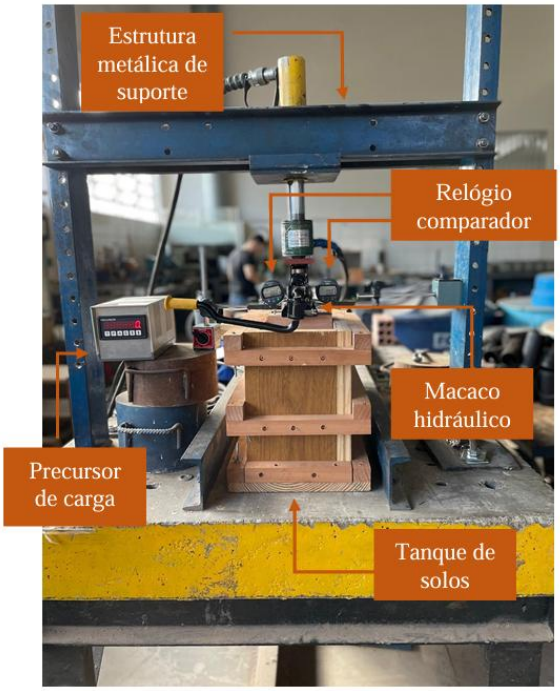


Figura 2. Aparato de ensaio para prova de carga.

O ensaio seguiu o modelo de carregamento em patamares com controle rígido de deslocamento. O macaco hidráulico aplicava carga de forma a gerar incrementos de avanço vertical de exatos 0,3 mm. Após cada incremento, aguardava-se para estabilização, o tempo necessário para permitir o rearranjo dos grãos de solo sob as novas tensões. Os dados de força na célula de carga e o deslocamento médio nos relógios comparadores eram registrados apenas após esse minuto de estabilização.

A execução procedeu continuamente até que o sistema atingisse um deslocamento vertical total de 15 mm em pelo menos um dos relógios comparadores. Este critério de parada foi estabelecido para garantir a obtenção de dados consistentes com as deformações exigidas por normas de referência (como a DNIT 055/2004 e a ASTM D1196/2021) para a análise de capacidade de suporte. As tensões verticais finais foram calculadas pela razão entre as cargas estabilizadas e a área da base da fundação modelo. Ao término de cada ensaio, a face frontal do tanque era removida, o padrão de ruptura registrado, e todo o solo descartado para a remontagem do ensaio seguinte.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização do solo

Os resultados dos ensaios de caracterização confirmaram que o solo argiloso utilizado é bem graduado, sendo composto por aproximadamente 75% de argila. O limite de liquidez (LL) obtido pelo método de Casagrande foi de 51%, enquanto o limite de plasticidade (LP) foi de 30%. A massa específica dos grãos (γ_s) resultou em 2,87 g/cm³.

3.2 Comportamento tensão-recalque e modos de ruptura

A análise dos ensaios em modelo reduzido permitiu identificar dois comportamentos distintos de ruptura, influenciados diretamente pela presença do aglomerante. Nas camadas sem adição de cimento (0%), observou-se a ruptura por puncionamento, característica de argilas e areias fofas. Nesse cenário, o modelo de fundação penetrou no solo sem gerar fissuração visível na superfície, indicando que a ruptura ocorreu no solo de base e que o conjunto fundação-reforço se comportou como um elemento único.

Por outro lado, todas as amostras cimentadas (0,5%, 2,0% e 8,0%) apresentaram ruptura por fissuração. O processo se iniciou nas bordas da fundação, onde há maior concentração de esforços de tração e cisalhamento, propagando-se até a superfície.



(a) (b)

Figura 3. Modos de ruptura observados: (a) puncionamento na amostra não cimentada; (b) fissuração na amostra cimentada.

3.3 Efeito da porosidade e do teor de cimento

Os resultados de tensão vertical em função dos deslocamentos, para todos os teores de cimento e massas específicas avaliados, estão compilados na Figura 4.

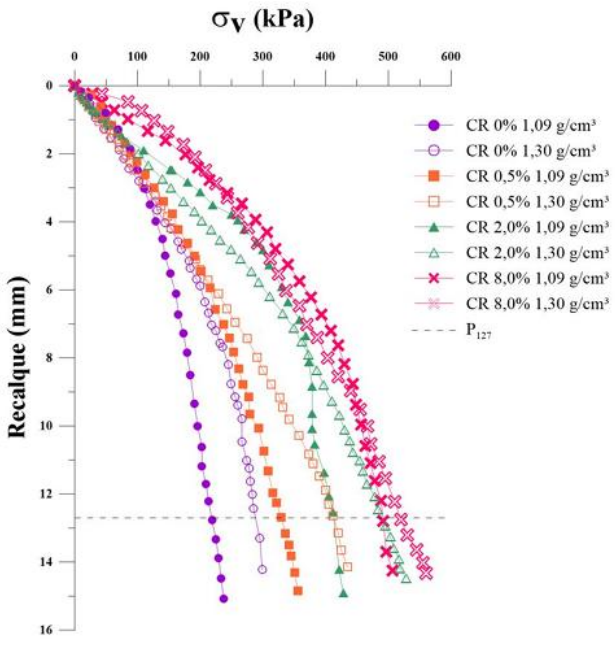


Figura 4. Curvas tensão vertical x recalque para todas as camadas ensaiadas.

A análise global das curvas demonstra que tanto o teor de cimento quanto o grau de compactação (representado pela massa específica aparente seca, γ_d) influenciam positivamente a capacidade de suporte do compósito. Para um mesmo recalque, a tensão suportada é diretamente proporcional ao teor de cimento. Da mesma forma, fixando-se a quantidade de aglomerante, as amostras moldadas com γ_d = 1,30 g/cm³ exigiram tensões significativamente maiores para atingir os mesmos deslocamentos das amostras com γ_d = 1,09 g/cm³.

3.4 Coeficiente de recalque e a relação η/C_{iv}

O coeficiente de recalque (k) foi calculado com base nas normas DNIT 055/2004 e ASTM D1196/2021, utilizando a tensão lida para o deslocamento vertical padronizado de 12,7 mm (w), conforme a Equação 1.

$$k = \frac{P_{127} - \frac{P_{ad}}{2}}{w} \tag{1}$$

Os resultados demonstraram que a adição de apenas 0,5% de cimento promoveu um ganho de resistência de cerca de 150% em relação ao solo natural. Além disso, constatou-se que o ganho de rigidez do sistema de fundação é governado pela interação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}).

A Figura 5 apresenta a correlação (R^2 = 0,93) encontrada entre o coeficiente de recalque e o índice $\eta/C_{iv}^{0,1}$ e demonstra que é possível alcançar um mesmo coeficiente de recalque alvo balanceando o grau de cimentação e a energia de compactação.

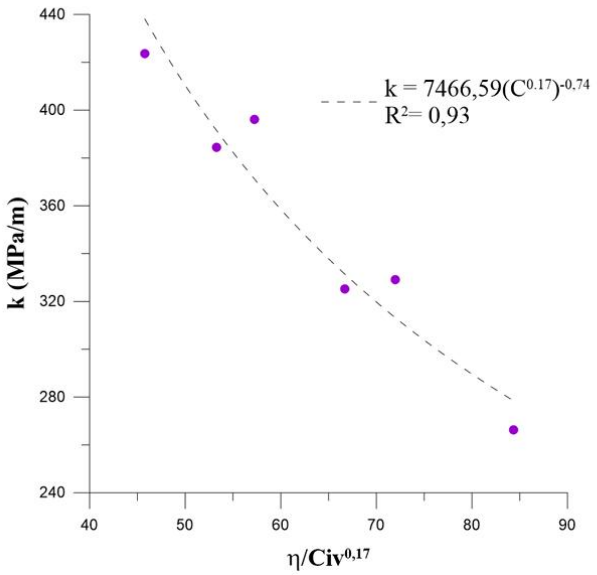


Figura 5. Relação entre o coeficiente de recalque (k) e o índice η/C_{iv}.

A principal implicação desse comportamento é a possibilidade de estimar o recalque de um solo artificialmente cimentado a partir de ensaios mais simples. Relacionando a equação obtida para k com os modelos de previsão de resistência à compressão simples (q_u) disponíveis na literatura para o mesmo solo, estabeleceu-se a formulação apresentada na Equação 2.

$$k = 3{,}92 \times 10^{(-15)} * \left(\eta/{C_{iv}}^{0,17}\right)^{8,2} * q_u \tag{2}$$

4 Considerações finais

- Foram identificados dois mecanismos de ruptura distintos durante as provas de carga: o puncionamento, restrito às amostras de solo natural sem reforço (com a ruptura ocorrendo no solo de base), e a ruptura por fissuração, característica de todas as misturas cimentadas (com a falha ocorrendo na própria camada de reforço).
- A redução da porosidade por meio da compactação mostrou-se necessária para o ganho de capacidade de suporte do sistema. O aumento do grau de compactação promoveu um incremento de 17% na resistência do compósito quando comparado às amostras de menor massa específica para um mesmo teor de cimento.
- A adição do aglomerante revelou-se eficaz. Mesmo em teores reduzidos, o cimento elevou expressivamente a resistência e o coeficiente de recalque da camada em comparação ao solo em seu estado natural.
- A utilização da razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) provou ser um parâmetro de controle adequado e eficiente para a avaliação do coeficiente de recalque do compósito estudado.
- O cruzamento dos dados experimentais com os resultados de resistência à compressão simples disponíveis na literatura para o mesmo solo viabilizou a formulação de uma correlação matemática. Essa relação permite estimar o coeficiente de recalque do solo melhorado a partir de ensaios laboratoriais mais simples e acessíveis, como o de compressão axial, otimizando as etapas de projeto.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

ASTM International (2021). Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. West Conshohocken.

Costa, V. (2023). O Efeito Da Estrutura Do Solo Residual De Cascavel/PR No Projeto De Obras De Contenção. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

Cruz, M., Jalali, S. (2010). Melhoramento Do Desempenho De Misturas De Solo-Cimento. In: 12º Congresso Nacional de Geotecnia. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2004). DNIT 055/2004 - ME: Solos - ensaio de penetração de cone (CPT). Rio de Janeiro.

Dias, J. J. F. M. S. (2012). *Tratamento De Solos Com Cimento Para Obtenção De Melhores Características Mecânicas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Foppa, D. (2016). *Novo Método Para Cálculo Da Capacidade De Carga De Fundações Superficiais Assentes Sobre Camada De Reforço Em Solo-Cimento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Ingles, O. G., Metcalf, J. B. (1972). *Soil Stabilization – Principles and Practice*. Butterworths Pty. Limited, Austrália.

Mota, A. L. F. (2017). *Uso Da Razão Porosidade/Teor Volumétrico Na Estimativa Do Comportamento Mecânico De Um Solo Argiloso Com Adição De Cimento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

Ortigão, J. A. R. (2007). *Introdução A Mecânica Dos Solos Dos Estados Críticos*. 3ª Ed. Revisada. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.

Pinto, C. S. (2006). *Curso Básico De Mecânica Dos Solos Em 16 Aulas*. 3ª edição. Oficina de Textos, São Paulo.

Salles, L. F. P. (1998). *Estudo do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solos Tratados*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre.

Schnaid, F., Lehane, B., Fahey, M. (2004). In situ test characterization of unusual soils. In: *Second international geotechnical and geophysical site characterization ics2*. Millpress, Rotterdam.

Specht, L. (2000). *Comportamento de Misturas Solo-Cimento-Fibra submetidas à carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Thomé, A. (1994). *Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Vesic, A. S. (1963). Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand. *Highway Research Record*, n. 39, p. 112-153.