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/COBRAMSEG2026.6/50

Modelos transparentes para estudo do comportamento de aterros sobre GECs com uso de PTCs enrijecidas com geossintéticos

Andréa Maria Pereira Vieira Lima
Doutoranda, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, andrea.vieira@estudante.ufscar.br

Fernando Henrique Martins Portelinha
Professor, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

RESUMO: Aterros construídos sobre colunas granulares constituem uma solução amplamente empregada para o melhoramento de solos moles. A incorporação de geossintéticos busca aumentar a eficiência desse sistema, seja por meio do encamisamento das colunas granulares, seja pela inserção de camadas de reforços horizontais na base do aterro. Além disso, uma plataforma de transferência de cargas (PTC), composta por material granular, é frequentemente utilizada para promover a redistribuição das tensões da superestrutura para as colunas. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a influência do enrijecimento pelo número de camadas de geogrelhas empregadas como reforço horizontal da PTC em aterros sobre colunas granulares encamisadas (GECs), por meio de modelagem física em escala reduzida com solos transparentes, combinada à técnica de correlação de imagens digitais (DIC). Os resultados indicaram que a inclusão de reforços horizontais modificou o mecanismo de transferência de cargas reduzindo os recalques diferenciais devido ao efeito de enrijecimento da plataforma. Os modelos reforçados transferiram maior parcela de carga para as colunas, reduzindo os esforços no solo mole. O efeito membrana foi observado em ambas as configurações com reduzido atuação do arqueamento, principalmente no modelo que utilizou multicamadas de reforços.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem física, Geossintéticos, Correlação de imagem digital (DIC), Arqueamento, Efeito membrana.

ABSTRACT: Embankments constructed over granular columns are a widely adopted solution for the improvement of soft soils. The incorporation of geosynthetics aims to enhance the efficiency of this system, either through the encasement of granular columns or by introducing horizontal reinforcement layers at the base of the embankment. In addition, a load transfer platform (LTP), composed of granular material, is commonly used to promote the redistribution of stresses from the superstructure to the columns. In this context, the present study aims to evaluate the influence of the number of geogrid layers used as horizontal reinforcement within the LTP in embankments supported by geosynthetic-encased granular columns (GECs), through reduced-scale physical modeling with transparent soils combined with the digital image correlation (DIC) technique. The results indicated that the inclusion of horizontal reinforcement reduced settlements due to the stiffening of the platform and altered the load transfer mechanism. The reinforced models transferred a greater portion of the load to the columns, thereby reducing stresses in the soft soil. The membrane effect was observed in both reinforced configurations, with the two-layer model proving more efficient in mitigating the loads transmitted to the foundation soil.

KEYWORDS: Physical modeling; Geosynthetics; Digital image correlation (DIC); Soil arching; Membrane effect.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o projeto e a construção de aterros sobre solos moles têm incorporado, de forma crescente, técnicas inovadoras de melhoramento de solo. Entre essas soluções, a execução de aterros apoiados sobre colunas granulares destaca-se como alternativa amplamente aplicada, em razão de sua viabilidade econômica, facilidade construtiva e adequação a diferentes condições geotécnicas. Mais recentemente, o uso de colunas granulares encamisadas com geotêxteis (GECs) tem recebido atenção significativa da comunidade técnica e científica, consolidando-se como uma solução eficiente para suporte de aterros, especialmente em solos de baixíssima resistência(Aghili *et al.*, 2021; Almeida; Hosseinpour; Riccio, 2013; Hosseinpour; Riccio;

Almeida, 2014; Jamshidi *et al.*, 2017; Moayed; Zade, 2017; Mohamadi *et al.*, 2023; Shafiee *et al.*, 2024; Tizpa; Jamshidi; Payan, 2023). A incorporação de uma camada granular na base do aterro, denominada plataforma de transferência de carga (PTC), também desempenha papel fundamental ao redistribuir tensões, reduzir concentrações de esforços nas cabeças das colunas, aumentar a capacidade de suporte do solo mole e minimizar recalques diferenciais (Deb, 2007; Shahu; Madhav; Hayashi, 2000). Quando associada a reforços geossintéticos inseridos na PTC, observa-se incremento adicional no desempenho estrutural do sistema, com melhoria da eficiência de transferência de carga (Abdullah; Edil, 2007; Deb; Basudhar; Chandra, 2007; Deb; Chandra; Basudhar, 2008; Deb; Samadhiya; Namdeo, 2011).

Apesar dos avanços observados, os mecanismos de transferência de carga em aterros sobre solos moles reforçados por colunas ainda não são plenamente compreendidos. Os procedimentos de dimensionamento atualmente empregados para aterros apoiados sobre GECs derivam, em grande parte, de metodologias originalmente desenvolvidas para aterros sobre estacas (BS 8006-1, 2010; EBGEO, 2011; FHWA, 2017). Tal analogia pode não representar adequadamente o comportamento real do sistema, considerando a maior compressibilidade das colunas granulares em comparação às estacas rígidas de concreto, o que implica mecanismos distintos transferência de carga. Nesse contexto, investigações experimentais controladas tornam-se essenciais para aprofundar a compreensão desses processos e aprimorar critérios de projeto.

A modelagem física em escala reduzida constitui ferramenta consolidada para a análise de problemas geotécnicos complexos, permitindo reproduzir condições representativas de campo sob ambiente controlado e com elevado controle de variáveis. Contudo, a instrumentação convencional pode interferir no comportamento do solo e comprometer a precisão das medições. Para superar essa limitação, a técnica de solo transparente tem sido amplamente adotada em associação com métodos ópticos de imageamento digital, possibilitando a observação direta dos mecanismos internos de deformação de forma não intrusiva (Iskander, 2010; Iskander; Bathurst; Omidvar, 2015; Liu; Iskander, 2010). Os solos transparentes são materiais bifásicos compostos por partículas sólidas translúcidas e fluidos com índices de refração compatíveis, conferindo-lhes transparência óptica, e que apresentam comportamento mecânico análogo ao de solos naturais.

Para simulação de materiais granulares, partículas de quartzo fundido saturadas com misturas de óleo mineral têm se mostrado eficazes, apresentando resistência ao cisalhamento comparável à de areias naturais (Ezzein; Bathurst, 2011; Iskander; Bathurst; Omidvar, 2015). Para representar solos coesivos, o Laponite RD®, um filossilicato sintético de magnésio–lítio estruturalmente relacionado à hectorita, forma suspensões transparentes quando hidratado, reproduzindo propriedades semelhantes às de argilas moles naturais, conforme demonstrado por ensaios de resistência, adensamento e permeabilidade (Ads; Iskander; Bless, 2020, 2020; Iskander; Liu; Sadek, 2002; Kong *et al.*, 2020; Liu; Iskander; Sadek, 2003; Ma *et al.*, 2022; Wallace; Rutherford, 2015; Wallace; Rutherford; Zheng, 2018).

Diante desse cenário, o presente estudo adota uma abordagem de modelagem física em condição 1g, utilizando a técnica de solo transparente, para investigar o comportamento de aterros construídos sobre solos moles reforçados por colunas granulares encamisadas com geossintéticos e dotados de plataforma de transferência de carga (PTC) também reforçada. O objetivo principal é avaliar a influência do número de camadas de reforço geossintético inseridas na PTC sobre os mecanismos de transferência de carga e o desempenho global do sistema. O solo mole foi simulado por meio de argila transparente à base de Laponite RD®, enquanto a plataforma granular foi representada por areia transparente de quartzo fundido. A resposta do modelo foi analisada por meio da técnica de DIC, utilizando o software *Ncorr*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solos transparentes

Para a simulação da argila mole, foi desenvolvida uma argila sintética transparente por meio da mistura mecânica de Laponite RD®, pirofosfato de sódio decahidratado (SPD) e água destilada. A Laponite RD® é um silicato lamelar sintético constituído por partículas com geometria relativamente uniforme, em formato de disco, com espessura aproximada de 0,92 nm e diâmetro médio de cerca de 25 nm. Embora seja intrinsecamente transparente, o material é comercializado na forma de pó branco devido aos efeitos de refração da luz. A adição de SPD teve como objetivo reduzir a viscosidade da mistura sem comprometer sua resistência, facilitando a eliminação de bolhas de ar durante a preparação e aprimorando a transparência do material final.

Após a preparação, a argila transparente foi mantida em repouso por 10 dias para obtenção da resistência necessária no modelo físico. A formulação adotada continha 7% de Laponite RD® e 0,075% de SPD (em massa). O comportamento mecânico da argila sintética foi avaliado por meio de ensaios triaxiais de compressão não adensados–não drenados (UU), conduzidos conforme a norma ASTM (2015), sob pressões confinantes de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa. Os resultados indicaram uma resistência ao cisalhamento não drenada média (Su) de 2,21 kPa, confirmando a adequação do material para representar solos moles em modelos físicos.

O material transparente utilizado na construção da plataforma de transferência de carga foi composto por partículas grossas de quartzo fundido saturadas com uma mistura líquida compatível. O quartzo fundido, obtido a partir de resíduos gerados durante a fabricação de vidro de quartzo, foi moído e peneirado para alcançar a distribuição granulométrica requerida para o modelo. O material apresentou diâmetro médio de partículas de 1,75 mm. Para garantir a transparência, o material granular foi saturado com um líquido cujo índice de refração se aproximasse do índice do quartzo fundido (n = 1,4585). Para esse fim, foi utilizada uma mistura em massa 1:1 de petrolato líquido (n = 1,4400) e óleo de terebintina (n = 1,4779). A areia transparente foi caracterizada por ensaios triaxiais de compressão adensados–não drenados (CU), realizados conforme a norma ASTM (2020). Os ensaios foram conduzidos sob pressões confinantes de 25, 50, 75 e 100 kPa, resultando em ângulo de atrito igual a 47,23° e coesão nula.

2.2 Geossintéticos

Materiais alternativos foram selecionados com o objetivo de reproduzir o comportamento mecânico de geossintéticos reais, considerando a redução de escala adotada nos modelos físicos. Um tecido não tecido (TNT) de polipropileno foi utilizado para o encamisamento das colunas granulares. Além disso, uma malha comercial de polietileno, com dimensões de abertura de 2 mm na direção transversal e 5 mm na direção longitudinal, foi empregada como material equivalente à geogrelha na plataforma de transferência de carga. O comportamento mecânico de ambos os materiais foi avaliado por meio de ensaios de tração em faixa larga, realizados de acordo com a norma ASTM (2024). As principais propriedades obtidas nos ensaios laboratoriais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais alternativos para simulação de geossintéticos

	TNT		Tela comercial	
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
Resistência à tração (kN/m)	1,6	3,0	2,9	4,0
Módulo de rigidez a 5% de deformação (kN/m)	8,3	23,3	4,6	10,2
Deformação máxima (%)	95,2	126,0	53,6	39,8

2.3 Modelo físico

O modelo físico em escala reduzida foi instalado em uma caixa de acrílico com dimensões internas de 400 mm de comprimento, 200 mm de largura e 400 mm de altura (Figura 1). Uma camada de espuma D28 com 60 mm de espessura foi posicionada na base do modelo para permitir a deformação vertical do solo mole sob a aplicação de carregamento. A camada de solo mole foi simulada por meio de 150 mm de argila sintética transparente à base de Laponite RD®. O sistema de fundação foi composto por duas GECs com diâmetro de 50 mm. O espaçamento entre eixos dos elementos (s) foi de 200 mm, resultando em um vão livre entre apoios (s − a) de 150 mm. A razão entre a altura da plataforma de transferência de carga e o vão livre (H/(s − a)) foi igual a 0,5. O material utilizado como preenchimento das GECs consistiu em quartzo fundido de granulometria fina. Esse material foi selecionado de modo a evitar interferências na transparência óptica dos solos sintéticos e garantir adequada visualização dos resultados experimentais. Suas propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas por meio dos mesmos procedimentos adotados para o quartzo fundido empregado na plataforma de transferência de carga. O material apresentou diâmetro médio de partículas de 0,65 mm, e o ângulo de atrito obtido em ensaios de compressão triaxial foi de 49,64°.

A plataforma de transferência de carga foi constituída por camadas alternadas de areia artificial transparente e reforço geossintético. Para garantir ancoragem adequada do reforço no modelo bidimensional,

ao reforço foi estendido verticalmente ao longo da interface entre o material granular e as paredes laterais da caixa de ensaio. Um plano vertical de referência, composto por partículas traçadoras opacas, foi implementado tanto na camada de solo mole quanto nas camadas granulares da LTP. Esse plano foi utilizado para análise dos campos de deslocamento por meio da técnica DIC utilizando o software Ncorr. O carregamento foi aplicado por meio de uma máquina universal de ensaios operando sob controle de deslocamento. Para simular o carregamento do aterro, o modelo foi submetido a um ensaio de compressão com taxa de deslocamento constante de 2 mm/min. As cargas foram transmitidas por meio de uma placa rígida e medidas com célula de carga. Os ensaios foram conduzidos até uma tensão aplicada máxima de 35 kPa. Três modelos físicos foram desenvolvidos neste programa experimental com o objetivo de investigar a influência da quatidade de camadas de reforço no comportamento da PTC. Foram avaliadas as situações sem reforço (R00), com uma camada (R01) e com duas camadas de reforço (R02), com espaçamento de 20 mm entre camadas.

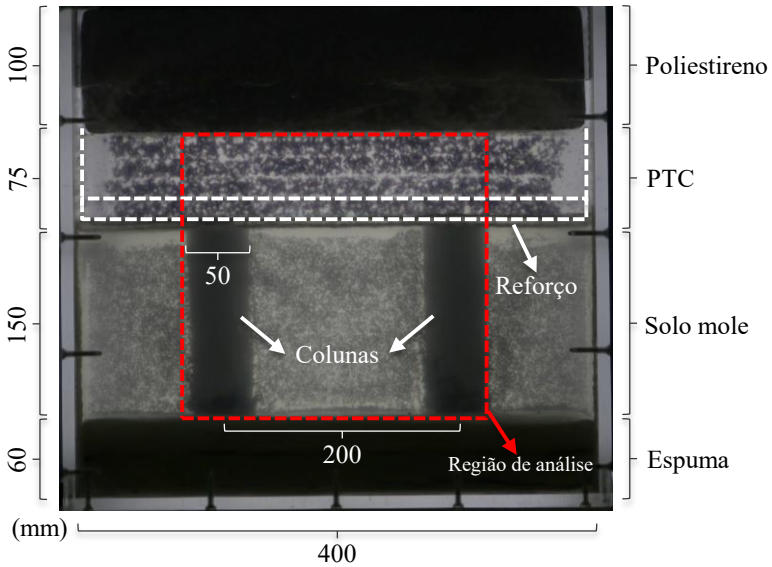


Figura 1. Layout do modelo físico

3 RESULTADOS

Os campos de deslocamento vertical obtido pela análise DIC são apresentados na Figura 2 correspondentes à tensão aplicada de 35 kPa (maior nível de tensão aplicada). Os mapas de deslocamento são exibidos com uma escala de cores variando de 0 a 20 mm de deslocamento, em que a cor azul representa as regiões de menor deslocamento e vermelha indica as regiões de maior deslocamento vertical no modelo.

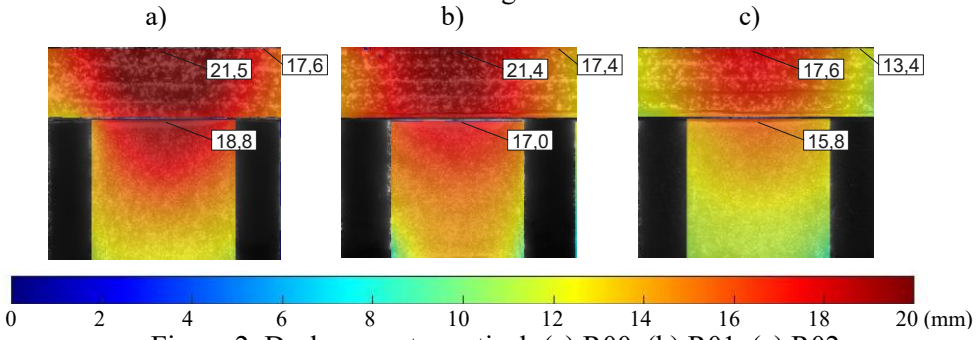


Figura 2. Deslocamento vertical: (a) R00, (b) R01, (c) R02

O modelo sem reforço horizontal (R00) apresentou os maiores deslocamentos verticais, conforme esperado. A incorporação de reforço geossintético promoveu a redução dos recalques observados, tanto na plataforma de transferência de carga (PTC) quanto na camada de solo mole subjacente. No último estágio de carregamento, a redução de recalque no centro do modelo, no topo da plataforma, foi de apenas 0,09% com a utilização de

uma camada de geogrelha. Esse desempenho aumentou significativamente para 18,02% com a adoção de duas camadas. Assim, a diferença de desempenho entre as configurações com uma e duas camadas atingiu 17,94% sob tensão aplicada de 35 kPa. Na região central, no topo da camada de solo mole, observou-se redução de recalque de 9,57% com uma camada de reforço e de 15,95% com duas camadas, resultando em diferença de 7,05% entre os modelos R01 e R02.

Nos três casos, os valores máximos de deslocamento concentraram-se na região central do modelo, especificamente no vão livre entre as estacas. Essa região, denominada zona móvel, é evidenciada em vermelho nos mapas de deslocamento. Observa-se que a área destacada no centro da PTC estendeu-se até as cabeças das colunas, indicando que, diferentemente do comportamento típico de aterros apoiados sobre elementos rígidos, as zonas móvel e estacionária (sobre o topo das colunas) não estavam claramente definidas. A diferenciação entre essas zonas torna-se mais perceptível no modelo R01, no qual se observam menores deslocamentos verticais sobre o topo das colunas. Mas é no modelo R02 que a distinção entre zona móvel e estacionária é mais evidente, conforme indicado pela variação de coloração nos mapas de deslocamento.

Esse comportamento está associado à maior flexibilidade das colunas granulares, que permite a ocorrência de deslocamentos verticais mais pronunciados. Tal recalque é fundamental para a mobilização da capacidade de carga das colunas encamisadas. Os mecanismos de transferência de carga baseados no arqueamento do solo e na ação de membrana são ativados somente após o desenvolvimento de deslocamentos relativos suficientes entre a zona estacionária e a zona móvel. Para entender melhor esses mecanismos, foram plotadas as curvas de transferência de cargas para os três modelos, relacionando ao carregamento aplicado em termos de força. Assim como o *Soil Arching Ratio* (SAR), correspondente a razão entre a carga total aplicada e a carga transferida para o solo de fundação (Figura 3).

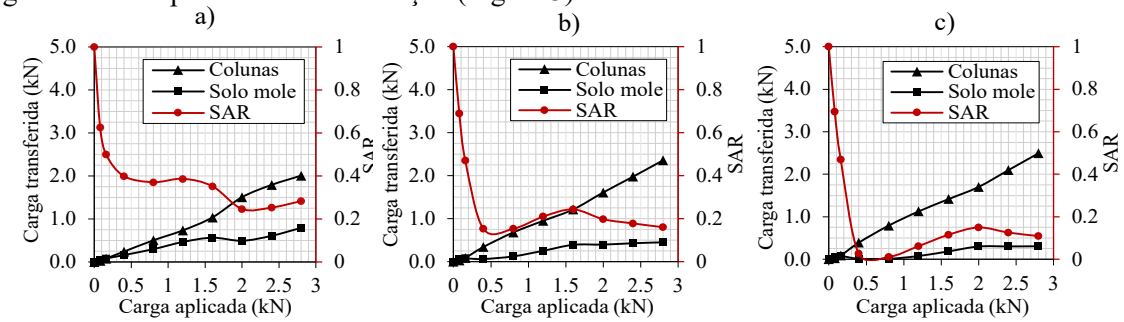


Figura 3. Transferência de cargas e SAR: (a) R00, (b) R01, (c) R02

Nos três casos analisados, a carga transferida para as colunas foi superior àquela direcionada ao solo mole, e as curvas de SAR apresentaram comportamento compatível com os padrões descritos na literatura. No modelo R00, observa-se inicialmente uma redução significativa do SAR até o estágio correspondente a 0,5 kN de carga aplicada. Em seguida, ocorre um leve aumento até 1 kN, seguido por uma segunda redução até 2 kN, quando o índice volta a crescer, atingindo valor final de 0,28. A primeira diminuição do SAR está associada à mobilização inicial do arqueamento do solo, momento em que a carga aplicada ainda não é suficiente para induzir deslocamentos verticais nas colunas, assim, a taxa de incremento da carga transferida ao solo mole é inferior ao aumento da carga total aplicada. A interrupção dessa tendência de queda coincide com o início dos deslocamentos verticais das colunas, o que favorece maior transferência de carga ao solo mole, justificando o aumento do SAR. A segunda redução do índice está relacionada à mobilização progressiva da capacidade de carga das colunas. Nos estágios finais de carregamento, observa-se uma tendência de estabilização do SAR. Comportamento semelhante foi verificado nos modelos reforçados; contudo, os valores de SAR foram inferiores aos do modelo não reforçado, indicando maior eficiência do sistema. No modelo com uma camada de reforço (R01), o valor final de SAR foi de 0,16, enquanto no modelo com duas camadas (R02) esse valor foi reduzido para 0,11, correspondendo a reduções de 42,8% e 60,7%, respectivamente, em relação ao modelo sem reforço. Esse resultado evidencia que a presença do reforço contribuiu para reduzir a parcela de carga transferida ao solo mole, aumentando a eficiência global do sistema.

A visualização do campo de deformações verticais permite identificar os mecanismos de transferência de tensões nos modelos analisados. A Figura 4 apresenta os campos de deformação vertical dos três modelos no último estágio de carregamento. As regiões em azul indicam deformações negativas (compressão), enquanto as regiões em vermelho representam deformações positivas.

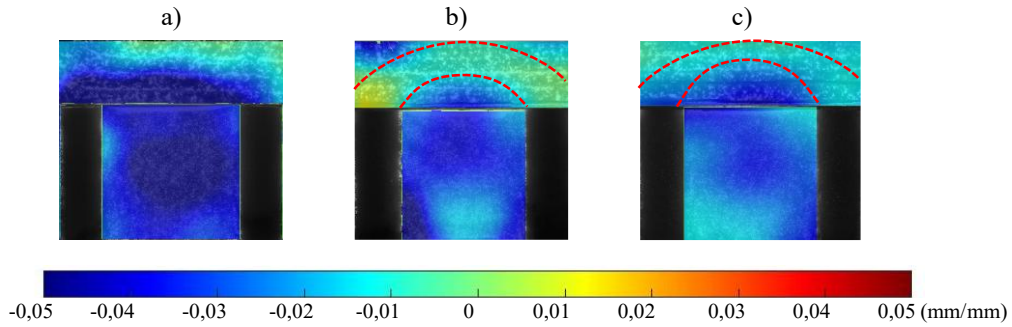


Figura 4. Deslocamento vertical: (a) R00, (b) R01, (c) R02

Entre os três modelos analisados, o modelo sem reforço basal apresenta maiores níveis de compressão na no solo mole, resultando na transferência de tensões verticais para porções mais profundas da camada. Deformações verticais relativamente elevadas também são observadas sobre as colunas granulares encamisadas (GECs), evidenciando a concentração de tensões nessas regiões. Quando se utiliza uma camada basal de geogrelha, as tensões verticais transmitidas ao solo mole são reduzidas em cerca de 18% em comparação com o modelo não reforçado, concentrando-se predominantemente na porção superior da camada de solo mole. Além disso, observa-se a formação de regiões de deformações positivas com configuração em formato de arco conectando o topo das colunas, indicando a atuação do mecanismo de arqueamento do solo. No caso do modelo com duas camas de reforço, as tensões transferidas ao solo de fundação mole são reduzidas em cerca de 41% em comparação com o modelo não reforçado. Nesse modelo, a formação em arco ainda é observada, porém com menor intensidade. Possivelmente, a utilização de duas geogrelhas promove o aumento da rigidez da PTC, conferindo-lhe um comportamento semelhante ao de uma laje. Esse mecanismo contribui para a redução das tensões transferidas ao solo mole de fundação.

Para melhor avaliar o desempenho do reforço com geogrelha, as deformações ao longo das camadas de reforço foram medidas ao longo de todo o processo de carregamento, por meio da técnica DIC. Foram registradas as maiores deformações medidas no reforço para cada estágio de aplicação e tensão. As curvas resultantes são apresentadas na Figura 5. A curva em vermelho corresponde ao modelo com uma camada de reforço, enquanto as curvas em azul correspondem ao modelo com duas camadas.

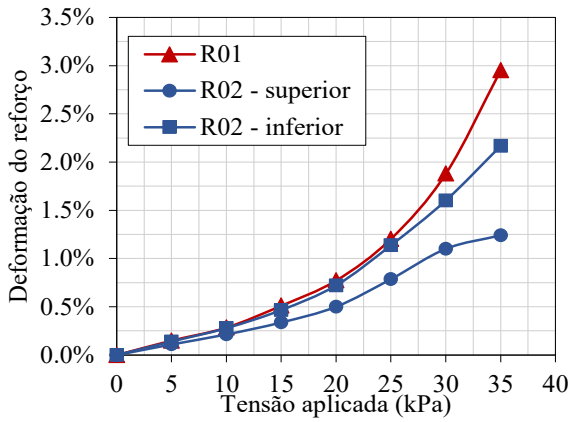


Figura 5. Deformação do reforço da PTC

O maior nível de deformação do reforço foi registrado no modelo R01, atingindo 2,9% no último estágio de carregamento. No modelo R02, as deformações máximas foram de 2,1% na camada inferior e 1,2% na camada superior. Observa-se que, nos estágios iniciais de carregamento, a camada inferior do modelo R02 apresentou deformações bastante semelhantes às do modelo R01, até a aplicação de 25 kPa, momento a partir do qual ambas as camadas passaram a apresentar redução na taxa de crescimento das deformações. Quando observado o último estágio de carregamento, A deformação total mobilizada pela atuação conjunta das duas camadas no modelo R02 foi comparável àquela verificada na configuração com camada única. Esse comportamento indica que a inserção de uma segunda camada de reforço não resultou em intensificação do efeito membrana. Dessa forma, a redução de recalques observada está provavelmente relacionada a uma maior

contribuição do mecanismo de arqueamento do solo na plataforma de transferência de carga. A presença da segunda camada, ao promover o enrijecimento da plataforma, favorece o desenvolvimento do arqueamento e, consequentemente, a melhoria do desempenho global do sistema.

4 CONCLUSÃO

Este estudo investigou os mecanismos de transferência de carga em aterros sobre solo mole apoiados em colunas granulares encamisadas, com e sem reforço geossintético, por meio de modelagem física com solos transparentes. A análise dos deslocamentos e deformações internos do solo, obtida a partir das imagens geradas pela técnica DIC, possibilitou avaliação detalhada do comportamento do sistema e comparação consistente entre as diferentes configurações analisadas. Conclui-se que:

- A incorporação de reforço geossintético na plataforma de transferência de carga (PTC) reduziu os recalques sem necessidade de alteração do espaçamento entre colunas, sendo o desempenho significativamente superior na configuração com duas camadas de reforço apresentando maior definição entre as zonas móvel e estacionária, favorecendo a redistribuição de tensões.
- A presença do reforço resultou em menor parcela de carga transferida ao solo mole, evidenciada pela redução dos valores de SAR, indicando maior eficiência dos sistemas reforçados, especialmente com duas camadas. Embora o modelo com uma camada também tenha apresentado redução do SAR, essa diminuição não se refletiu em redução significativa dos recalques.
- As medições de deformação no reforço indicam que a melhoria de desempenho observada com duas camadas não está associada ao aumento da ação de membrana, mas possivelmente ao aumento da rigidez da PTC e à consequente intensificação do arqueamento do solo.
- O número de camadas de reforço e seu posicionamento na PTC constituem fatores relevantes para o ganho de rigidez da plataforma e para o desempenho global de aterros sobre solos moles apoiados em colunas granulares encamisadas.

De modo geral, os modelos foram capazes de representar adequadamente o comportamento de aterros sobre solos moles apoiados em GECs, utilizando solos transparentes como material de simulação. Os resultados obtidos contribuem para o entendimento dos mecanismos de transferência de carga em PTCs reforçadas com geossintéticos sobre apoios semirrígidos, podendo contribuir para o aprimoramento das metodologias de dimensionamento desse tipo de sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – Processo nº 2025/07603-0 –, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001 –, ao Geosynthetic Institute (GSI) e à empresa Huesker pelo suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, C. H.; EDIL, T. B. Behaviour of geogrid-reinforced load transfer platforms for embankment on rammed aggregate piers. **Geosynthetics International**. v. 14, 3, p. 141–153. 2007. ISSN: 10726349. DOI: 10.1680/gein.2007.14.3.141

ADS, A.; ISKANDER, M.; BLESS, S. Soil–projectile interaction during penetration of a transparent clay simulant. **Acta Geotechnica**. v. 15, 4, p. 815–826. 2020

ADS, A.; ISKANDER, M.; BLESS, S. Shear strength of a synthetic transparent soft clay using a miniature ball penetrometer test. **Geotechnical Testing Journal**. v. 43, 5. 2020

AGHILI, E.; HOSSEINPOUR, I.; JAMSHIDI, R.; AHMADI, H. Transportation Geotechnics Behavior of granular column-improved clay under cyclic shear loading. **Transportation Geotechnics**. v. 31, September, p. 100654. 2021

ALMEIDA, M. S. S.; HOSSEINPOUR, I.; RICCIO, M. Performance of a geosynthetic-encased column (GEC) in soft ground: Numerical and analytical studies. **Geosynthetics International**. v. 20, 4, p. 252–262. 2013

ASTM D2850-15. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. 2015

ASTM D4595/D4595M-24. Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method. 2024

ASTM D7181-20. Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. 2020

BS 8006-1. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fill. 2010

DEB, K. Modeling of granular bed-stone column-improved soft soil. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. v. 32, p. 1267–1288. 2007

DEB, K.; BASUDHAR, P. K.; CHANDRA, S. Generalized Model for Geosynthetic-Reinforced Granular Fill-Soft Soil with Stone Columns. **International Journal of Geomechanics**. v. 7, 4, p. 266–276. 2007

DEB, K.; CHANDRA, S.; BASUDHAR, P. K. Response of multilayer geosynthetic-reinforced bed resting on soft soil with stone columns. **COMPUTERS AND GEOTECHNICS**. v. 35, 3, p. 323–330. Indian Inst Technol, Dept Civil Engn, Roorkee 247667, Uttar Pradesh, India. 2008

DEB, K.; SAMADHIYA, N. K.; NAMDEO, J. B. Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay. **GEOTEXTILES AND GEOMEMBRANES**. v. 29, 2, p. 190–196. 2011

EBGEO. Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements. Munchen, Germany. 2011. ISBN: 9783433029831

EZZEIN, F. M.; BATHURST, R. J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling. **Geotechnical Testing Journal**. v. 34, 6, p. 590–601. 2011

FHWA. Ground Modification Methods - Reference Manual - Volume II. 2017

HOSSEINPOUR, I.; RICCIO, M.; ALMEIDA, M. S. S. Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 42, 4, p. 363–373. 2014

ISKANDER, M. **Modeling with Transparent Soils**. Berlin: Springer. 2010

ISKANDER, M.; BATHURST, R. J.; OMIDVAR, M. Past, Present, and Future of Transparent Soils. **Geotechnical Testing Journal**. v. 38, 5, p. 557–573. 100 BARR HARBOR DR, W CONSHOHOCKEN, PA 19428-2959 USA. 2015

ISKANDER, M. G.; LIU, J.; SADEK, S. Transparent amorphous silica to model clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 128, 3, p. 262–273. 2002

JAMSHIDI, R.; MEHRAN, C.; FARD, K.; JAMSHIDI, M. Physical and Numerical Modeling of Stone Column Behavior in Loose Sand. **International Journal of Civil Engineering**. 2017

KONG, G.; ZHOU, Y.; YANG, Q.; WANG, C.; CHEN, Y. Geotechnical Properties of a New Transparent Clay. **International Journal of Geomechanics**. v. 20, 12, p. 06020032. 2020

LIU, J.; ISKANDER, M. G. Modelling capacity of transparent soil. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 47, 4, p. 451–460. 2010

LIU, J.; ISKANDER, M. G.; SADEK, S. Consolidation and Permeability of Transparent Amorphous Silica. **Geotechnical Testing Journal**. v. 26, 4, p. 390–401. 2003

MA, S.; DUAN, Z.; HUANG, Z.; LIU, Y.; SHAO, Y. Study on the stability of shield tunnel face in clay and clay-gravel stratum through large-scale physical model tests with transparent soil. **Tunnelling and Underground Space Technology**. v. 119, August 2021, p. 104199. 2022

MOAYED, R. Z.; ZADE, M. H. Numerical Analysis of Geosynthetic- Encased Stone Columns under Laterally Loads. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**. v. 11, 1, p. 15–20. 2017

MOHAMADI, M.; IMAN, M.; MEGHDAD, H.; REZA, P.; CHENARI, J. Shear Strength Behavior of Soft Clay Reinforced with Ordinary and Geotextile - Encased Granular Columns. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**. v. 9, 6, p. 1–14. 2023

SHAFIEE, A.; FATHIPOUR, H.; PAYAN, M.; JALILI, J.; JAMSHIDI, R. Modulus reduction and damping characteristics of geotextile-reinforced sands. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. v. 181, April, p. 108641. 2024

SHAHU, J. T.; MADHAV, M. R.; HAYASHI, S. Analysis of soft ground-granular pile-granular mat system. **Computers and Geotechnics**. v. 27, 1, p. 45–62. 2000

TIZPA, P.; JAMSHIDI, R.; PAYAN, M. Computers and Geotechnics PFC / FLAC 3D coupled numerical modeling of shallow foundations seated on reinforced granular fill overlying clay with square void. **Computers and Geotechnics**. v. 161, June, p. 105574. 2023

WALLACE, J. F.; RUTHERFORD, C. J. Geotechnical properties of LAPONITE RD®. **Geotechnical Testing Journal**. v. 38, 5, p. 574–587. 2015

WALLACE, J. F.; RUTHERFORD, C. J.; ZHENG, J. Visualizing failure surfaces in soft clay due to suction caisson loading. **Geotechnical Special Publication**. v. 2018-March, GSP 294, p. 172–180. 2018