

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/611

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ATERROS SOBRE ESTACAS E SOBRE COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS

Andréa Maria Pereira Vieira

Mestranda, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, andrea.vieira@estudante.ufscar.br

Dhionata Wyllian Moreira Santos

Mestre, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, dhionata.wsantos@gmail.com

Gregório Luís Silva Araujo

Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, gregorio@unb.br

Fernando Henrique Martins Portelinha

Professor, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

RESUMO: Modelagem física com uso de solos transparentes, associados a técnicas de imagens digitais, têm sido frequentemente utilizados em modelagens de problemas geotécnicos. Atualmente, o entendimento dos mecanismos de transferência de carga envolvidos no uso de geogrelhas em aterros estaqueados tem avançado significativamente, enquanto tal conhecimento é escasso para fundações em colunas encamisadas. Dessa forma, o presente artigo visa comparar o comportamento de bases granulares apoiadas em elementos de fundação compostos por estacas rígidas e colunas granulares encamisadas. O material granular de base, também chamada de plataforma de transferência de carga (PTC), foi simulado por uma areia transparente confeccionada com quartzo fundido saturado em líquido compatível, enquanto o solo mole foi simulado por meio de uma argila sintética transparente produzida com uso da Laponite RD®. A análise do padrão de deformação e os mecanismos de transferência de carga dos solos transparentes foram avaliados com o uso de correlação de imagem digital (DIC). Os resultados mostraram que o uso de solos transparentes em modelos de escala reduzida pode auxiliar significativamente no entendimento de mecanismos em problemas envolvendo aterros sobre solos moles. Os resultados mostraram que os mecanismos de transferência de cargas de um sistema de aterro sobre colunas podem ser diferentes em relação ao tradicional sistema de aterros estaqueados.

PALAVRAS-CHAVE: Arqueamento, Transferência de cargas, Solos transparentes, DIC.

ABSTRACT: Transparent materials with characteristics similar to natural soils, combined with digital imaging techniques, have been frequently employed in modeling geotechnical problems, facilitating the analysis and interpretation of soil behavior, as they enable wide visualization and quantification of internal displacements. This allows for observing mechanisms that are impossible to observe using other experimental techniques. Furthermore, this is a technique that holds great potential for studying problems involving embankments on soft soils, including understanding mechanisms in structured or improved systems. The main difficulty in applying transparent soil techniques for simulating embankments lies in the contrast between the properties of the embankment soil and the foundation soil, which makes it challenging within the scope of transparent soil technique as a transparent stratified system must be developed. Thus, this paper proposes and reports on the development of a stratified system of transparent soils to investigate the behavior of load transfer platforms (PTCs) supported by foundation elements composed of rigid piles and encased granular columns. The granular material of the PTC was simulated by transparent sand made from fused quartz saturated with a mixture of mineral oils, while the soft soil was simulated using transparent synthetic clay produced using Laponite RD®. The analysis of deformation patterns and load transfer mechanisms of transparent soils was evaluated using digital image correlation (DIC). The results showed that the use of transparent soils in reduced-scale models can significantly aid in understanding mechanisms in problems involving embankments on soft soils. The PTCs constructed atop rigid supports exhibited notably smaller vertical displacements compared to those with semi-rigid columns. The addition of geosynthetics as reinforcement in the PTC notably contributed to reducing the occurrence of differential settlements. In the model with rigid supports, the mobilization of the geosynthetic was more pronounced, resulting in a notable stiffening effect within the PTC.

KEYWORDS: Arching effect, Load Transfer, Transparent Soils, DIC.

1 INTRODUÇÃO

Construções sobre solos moles tendem a enfrentar recalques excessivos, grandes deformações laterais e instabilidade local e global. Como forma de solução para esses problemas, são comumente utilizados aterros apoiados em estacas reforçadas com geossintéticos (GRPS) ou apoiados em colunas reforçadas com geossintéticos (GRCS), uma vez que ambas as técnicas são executadas de forma rápida e não necessitam da substituição do solo (Wu et al., 2022). Plataformas de transferências de cargas (PTC), constituídas de uma camada de material granular, são comumente construídas em bases de aterros sobre estacas para facilitar a transferência de carga das superestruturas (Ghosh et al., 2021). De forma semelhante, em aterros apoiados sobre colunas granulares, é comum a utilização de uma camada granular sobre as colunas, visando a distribuição de tensões no topo da coluna e drenagem do sistema (Mitchell, 1981). Estudos afirmam que a presença da camada granular proporciona a redução da concentração de tensões próximo ao topo do elemento, aumenta a capacidade de carga do solo mole e reduz recalques diferenciais (Shahu et al., 2000; Deb, 2008). No entanto, os mecanismos envolvidos na transferência de cargas em PTCs reforçadas e não reforçadas sobre colunas granulares podem se diferenciar em relação aos aterros estaqueados, devido a diferença de rigidez entre os apoios. Assim, faz-se importante o entendimento dos mecanismos de transferência de cargas entre a PTC reforçada e colunas granulares.

O desenvolvimento de materiais transparentes com características semelhantes ao solo natural permite a modelagem de problemas geotécnicos, facilitando a análise e interpretação do comportamento do solo (Liu & Iskander, 2010). Estudos mostram que grãos de quartzo fundido saturados com líquidos com compatível índice de refração resulta em um solo transparente com propriedades semelhantes às de areias (Ezzein & Bathurst, 2011). Outras pesquisas recentes investigaram uma nova família de solos transparentes, produzidos com Laponite RD® saturada com água, que apresenta características compatíveis com a simulação de argila mole (Iskander et al., 2015). Os solos transparentes têm sido utilizados para modelagem física em diversos estudos relacionados à geotecnia. Ademais, pesquisas recentes apresentam a possibilidade da utilização da técnica para simulação de solos reforçados com geossintéticos (J. Chen et al., 2021; J. F. Chen et al., 2019; Ding et al., 2020; Gao, Liu, et al., 2022; Gao, Xie, et al., 2022; Souza et al., 2023; Zhao et al., 2019). Ainda assim, não foram encontrados, na literatura, estudos acerca dos mecanismos de transferência de cargas de PTCs reforçadas com geossintéticos utilizando a técnica dos solos transparentes.

Tendo em vista o potencial dos solos transparentes quanto a modelagem física de problemas geotécnicos, em especial de solos reforçados com geossintéticos, o presente estudo propõe o monitoramento de quatro modelos físicos em escala 1:10 (campo:laboratório), utilizando um sistema estratificado de solos transparentes, para estudar o efeito da rigidez da fundação em aterros sobre solos moles. O comportamento dos modelos foi investigado com o auxílio da técnica de correlação de imagem digital (DIC), utilizando o software *Ncorr*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos materiais

Para simular a argila mole, foi utilizada uma argila sintética transparente produzida pela mistura de Laponite RD®, pirofosfato de sódio decahidratado (PSD) e água destilada, utilizando um misturador mecânico, preparada com Laponite RD® e PSD. Para a caracterização do material, foram conduzidos ensaios de compressão triaxial do tipo UU (Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, 2015). Foram aplicadas tensões confinantes de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa, e os ensaios foram realizados a uma velocidade de 0,05 mm/min. Os ensaios resultaram em um valor de S_u médio igual a 2,21 kPa.

O material transparente utilizado para confecção da plataforma de transferência de carga consiste na combinação de partículas de quartzo fundido grosso, saturadas com uma mistura líquida compatível (Santos, 2023). Esses componentes possuem índices de refração compatíveis, garantindo assim, a transparência do material. A caracterização da areia transparente foi conduzida por meio de ensaios de granulometria (NBR 718, 2016), determinação do índice de vazios máximo (NBR 16840, 2021), determinação do índice de vazios mínimo (NBR 16843, 2020) e ensaios de compressão triaxial do tipo CU (ASTM, 2020). Os ensaios de compressão triaxial foram realizados com tensões confinantes de 25 kPa, 50 kPa, 75 kPa e 100 kPa. O material utilizado como preenchimento das colunas granulares encamisadas consistiu em quartzo fundido de

granulometria fina, cujas características foram avaliadas de forma semelhante ao quartzo fundido utilizado na PTC. O resumo das propriedades obtidas nos ensaios está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do quartzo fundido

Propriedade	PTC	Coluna granular
Diâmetro da partícula (mm)	D ₆₀	0,70
	D ₅₀	0,65
	D ₃₀	0,42
	D ₁₀	0,20
Coefficiente de curvatura	C _c	1,26
Coefficiente de uniformidade	C _u	3,50
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	ρ _{d,máx}	1,11
Índice de vazios mínimo	e _{min}	0,98
Massa específica aparente seca mínima (g/cm ³)	ρ _{d,min}	0,92
Índice de vazios máximo	e _{máx}	1,38
Ângulo de atrito (°)	φ	49,64

Quanto aos materiais escolhidos para a simulação de geossintéticos, foi utilizado um tecido não tecido (TNT) de polipropileno como geotêxtil de encamisamento das colunas granulares e para substituir a geogrelha de reforço da PTC, foi utilizada uma tela comercial de polietileno com aberturas de 2 mm (transversal) por 5 mm (longitudinal). A caracterização desses materiais foi conduzida por meio de ensaio de tração de faixa larga (NBR ISO 10319, 2013). Dada a necessidade da realização de emendas no TNT, devido ao formato tubular da camisa, também foi analisada a eficácia da emenda por colagem com adesivo termoplástico (NBR ISO 10321, 2013). As principais propriedades dos materiais estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades dos materiais de simulação de geossintéticos

Propriedade	Tecido não tecido			Tela de polietileno	
	Transversal	Longitudinal	Emenda	Transversal	Longitudinal
Resistência à tração (kN/m)	1,58	3,00	2,55	2,94	4,00
Módulo de rigidez (kN/m)					
a 2% de deformação	9,39	36,20	20,78	3,26	10,16
a 5% de deformação	8,31	23,33	19,85	4,65	10,19
Deformação na ruptura (%)	95,22	126,05	86,04	53,56	39,80
Gramatura g/m ²	74,850	-	-	58,362	-
Espessura (mm)	0,421	-	-	0,813	-

2.2 Modelo físico transparente

Foram executados modelos físicos em escala reduzida de 1g, na proporção de 1:10 (laboratório:campo), com o objetivo de simular o comportamento de aterros sobre solos moles, apoiados em estacas e colunas granulares, com plataforma de transferência de cargas reforçada com geogrelhas. O modelo foi alojado dentro de 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 6 cm de altura, foi colocada na base do modelo com o objetivo de permitir o deslocamento do solo mole quando sujeito à aplicação de carga. Para simular o solo mole, foi empregada uma camada de 150 mm de argila sintética transparente, composta de Laponite RD® e Pirofosfato de sódio decahidratado (PSD), reforçada por duas estacas rígidas com capitel (a) de 50 mm x 50 mm ou duas colunas granulares encamisadas de 50 mm de diâmetro (a), com espaçamento entre apoios (s) de 200 mm e vão livre entre apoios (s-a) de 150 mm. A relação da altura da PTC com o vão livre entre apoios (H/s-a) é de 0,5. A fim de reduzir o atrito entre o solo mole e a caixa de acrílico, as paredes internas da caixa foram revestidas com uma camada fina de vaselina líquida, seguida por uma folha de filme de poliéster. A PTC foi constituída por camadas alternadas de areia artificial transparente e geossintético de reforço no topo das estacas e colunas. Para garantir a perfeita ancoragem do reforço no modelo 2D, prolongou-se o reforço de forma a subir verticalmente no contato do solo granular com a parede da caixa de ensaios conforme ilustrado na Figura 1. No sentido transversal do problema, nenhuma fixação foi realizada de forma a garantir o estado

plano bidimensional de deformações e tensões idealizada na modelagem. Foi implementado um plano vertical composto por partículas opacas na camada de solo mole e nas camadas granulares da PTC. Esse plano foi empregado para analisar os deslocamentos por meio da correlação de imagens digitais (DIC), utilizando o software *Ncorr*. O modelo foi submetido a tensões por meio de uma máquina de ensaios universais que aplicou carga com taxa de deslocamento controlada. Para simular a carga no aterro, o modelo foi submetido a um ensaio de compressão a uma velocidade de 0,5 mm/min, em que as forças são transmitidas por meio de uma placa rígida e medidas por uma célula de carga. Os registros fotográficos foram capturados a cada três segundos durante todo o período de aplicação da carga. As partículas pretas marcadoras presentes nos modelos são necessárias para captura dos campos de deslocamento.

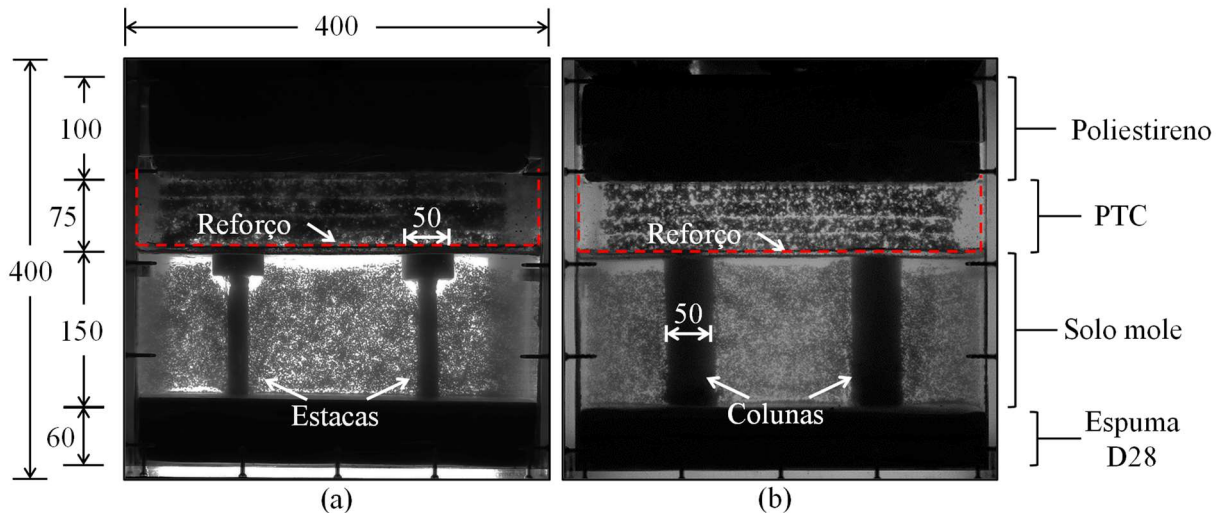


Figura 1. Esquema dos modelos físicos ensaiados: (a) aterro estaqueado; (b) aterro sobre colunas granulares encamisadas.

2.3 Programa de ensaios

No presente programa experimental foram propostos quatro modelos físicos com o objetivo de analisar a influência da rigidez do elemento de apoio e da presença de camadas de geossintéticos no reforço da PTC. Foram elaborados dois modelos com PTCs apoiadas em estacas rígidas (GRPS) e dois modelos com colunas granulares encamisadas (GRCS), com e sem a presença do reforço geossintético (Tabela 1).

Tabela 1. Programa de ensaios

Nº	Ensaio	Tipo de suporte	Número de camadas de reforço
1	GRPS-R00	Estaca rígida	0
2	GRPS-R01	Estaca rígida	1
3	GRCS-R00	Coluna granular encamisada	0
4	GRCS-R01	Coluna granular encamisada	1

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da observação dos deslocamentos internos dos modelos físicos de solos transparentes, por meio das imagens geradas pelo software *Ncorr*, foi possível analisar o efeito da rigidez da fundação no comportamento das PTCs. A Figura 2 apresenta os campos de recalques dos modelos de aterros estaqueados e sobre colunas encamisadas, respectivamente, analisados sob uma tensão de 35 kPa, correspondente ao último estágio de carregamento dos ensaios. Os modelos que empregaram apoios rígidos exibiram menores deslocamentos verticais, como esperado, com valores máximos no centro do modelo, mais precisamente no espaço entre as estacas. Os recalques no topo da PTC foram observados com valores de 14,54 mm e 11,89 mm nos modelos GRPS-R00 e GRPS-R01, respectivamente. Além disso, foi notada a presença de uma massa estacionária bem definida, pois os recalques na PTC, acima das colunas, foram praticamente inexistentes.

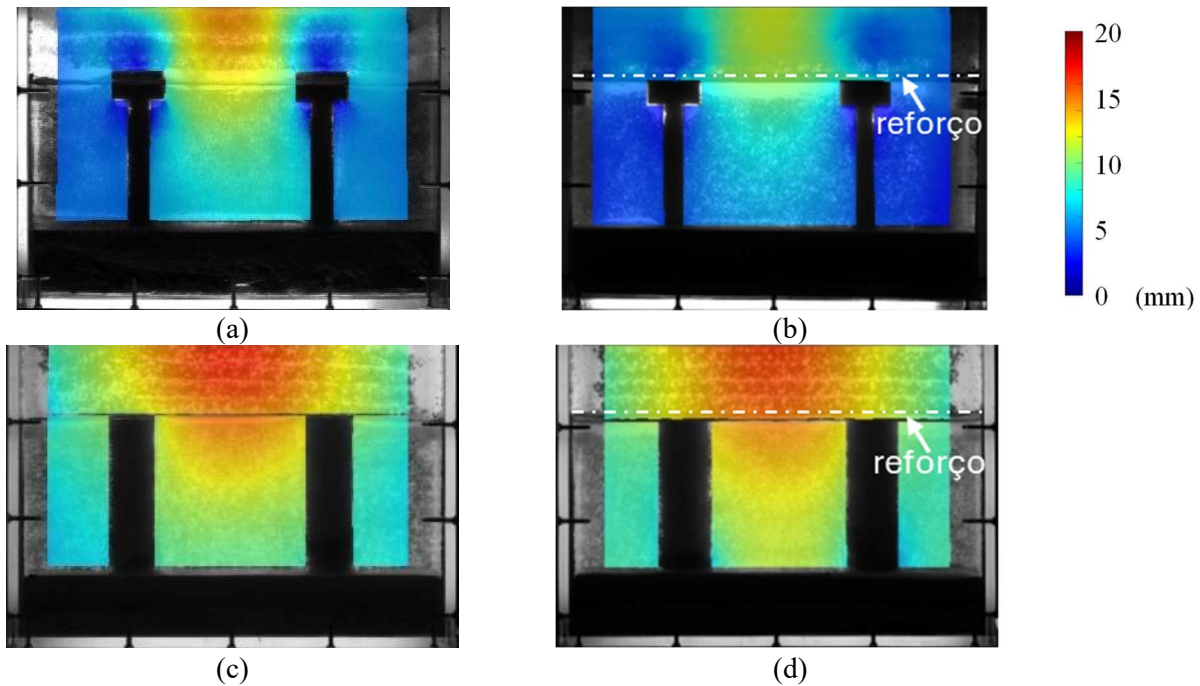


Figura 2. Campo de deslocamentos verticais: (a) GRPS-R00, (b) GRPS-R01, (c) GRCS-R00, (d) GRCS-R01

Por outro lado, nos modelos em que a PTC foi apoiada em colunas encamisadas que, comparados aos modelos estaqueados, podem ser consideradas semirrígidas. Nesse caso, foram registrados maiores deslocamentos verticais no topo da PTC, com valores de 16,5 mm e 15,1 mm nos modelos GRCS-R00 e GSCS-R01, respectivamente. Embora esses deslocamentos ainda estivessem concentrados na região central do modelo, eles se propagaram na PTC em direção à área sobre as colunas. A grande diferença entre os dois sistemas está no fato de que os mecanismos de transferência de carga decorrente do efeito de arqueamento e/ou efeito membrana ocorrem somente que houve deslocamento relativo entre a massa estacionária (acima das estacas e colunas) e a massa ativa (entre colunas). Com isso, pode-se dizer que o sistema de aterro sobre colunas sobre um recalque uniforme inicial, resultado da mobilização da tração no encamisamento, até que o deslocamento relativo entre as massas ativas e estacionárias ocorram. Em contraste, os aterros estaqueados, por serem sistemas mais rígidos, tem os mecanismos de transferência ocorrendo para menores recalques totais. No entanto, é importante observar que, em ambas as situações, é perceptível a ocorrência de recalques diferenciais entre o solo mole e os elementos de fundação muito semelhantes, indicando uma possível semelhança nos mecanismos de transferência, porém de magnitude diferentes. No que tange ao uso de geogrelhas como sistemas de transferência, observou-se uma redução de 18,22% do deslocamento vertical no topo da PTC dos modelos GRPS (estaqueados), como contribuição do efeito membrana proporcionado pela presença da geogrelha (Figura 2b). No caso dos modelos GRCS (colunas encamisadas), os recalques na PTC apresentaram uma redução de 8,48%, mostrando que a contribuição do efeito membrana é reduzido ao aplicar a geogrelha sobre colunas encamisadas (Figura 2d).

Para entendimento da contribuição do efeito membrana, a Figura 3 apresenta uma comparação da distribuição das deformações ao longo do comprimento da geogrelha nos modelos reforçados, que podem ser entendidas como as cargas mobilizadas. No modelo GRPS, observa-se que a geogrelha sofreu maior deformação na região sobre as colunas, onde o geossintético é sujeito a cargas de tração mais elevadas devido à diferença entre os deslocamentos verticais no topo das colunas e no topo da camada de solo mole. Esse pico de deformação (e mobilização de tração) é típico de mecanismos de efeito membrana (Figura 3a). No modelo GRCS (Figura 3b), o padrão de comportamento é semelhante ao observado, porém o pico de deformação na proximidade da coluna é bastante inferior. É interessante notar que, embora a deformação máxima no reforço do modelo de aterro estaqueado seja quase que 20 vezes maior, os níveis de recalques não seguem a mesma proporção, sendo a diferença de somente 4 mm entre ambos os modelos. Isso indica que a diferença do comportamento de deslocamentos verticais do modelo de aterros sobre colunas pode estar favorecendo (ou potencializando) a contribuição do arqueamento em relação aos modelos GRPS. Em outras palavras, ao mobilizar o efeito

membrana, o efeito do arqueamento, que necessita de maiores deslocamentos para ocorrer pode ser reduzido no caso do modelo GRPS, enquanto nos modelos GRCS, cujos deslocamentos são maiores podem estar invertendo o mecanismo. Assim, nota-se que o reforço geossintético desempenha um papel distinto em aterros sobre solos moles apoiados em elementos rígidos ou semirrígidos.

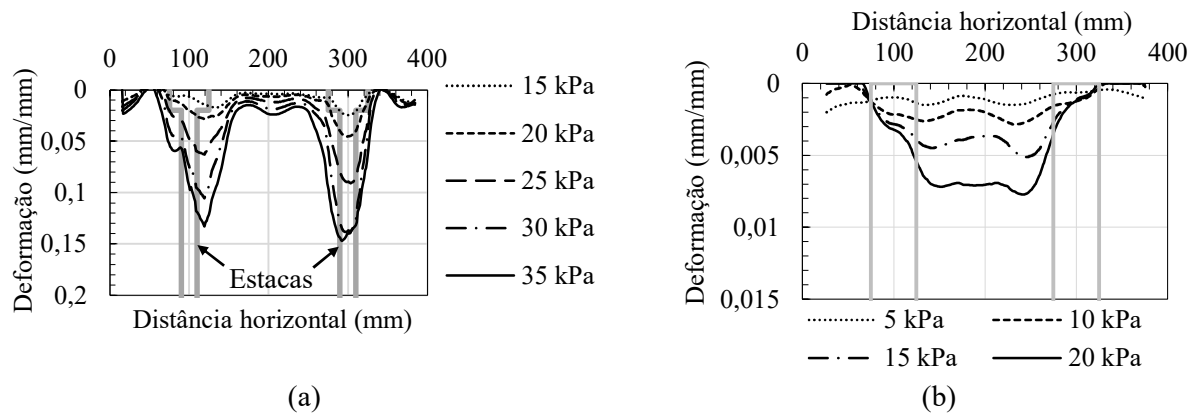


Figura 3. Deformação na geogrelha de reforço: (a) GRPS-R01, (b) GRCS-R01.

Uma medida importante para o entendimento do papel dos mecanismos de transferência é quanto ao nível de carga transferida para as estacas ou colunas. Tal quantificação permite discutir sobre o papel da geogrelha na eficiência do sistema. As cargas em aterros sobre solos moles reforçado com geogrelhas são divididas em três componentes: A, o carregamento transferido diretamente para as colunas pelo arqueamento do solo; B, o carregamento no reforço geossintético transferido para as colunas pelo efeito membrana; e C, o carregamento transmitido para o solo mole. Na Figura 4 são mostrados os campos de deformações verticais como representante das tensões transferidas às colunas ou estacas.

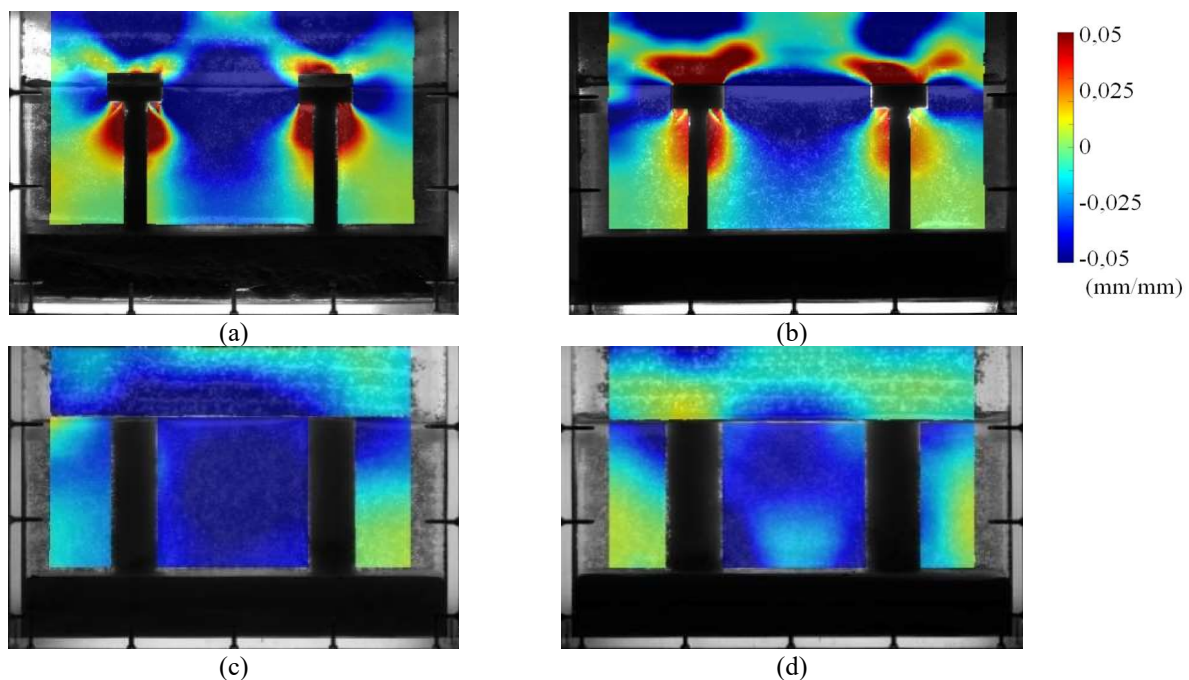


Figura 4. Campo de deformações verticais: (a) GRPS-R00, (b) GRPS-R01, (c) GRCS-R00, (d) GRCS-R01

Na mencionada figura, as deformações positivas indicam tração, e as positivas deformações de compressão. Primeiramente, nota-se o arqueamento atuando isoladamente no modelo estaqueado não reforçado (Figura 4a), gerando zonas de alta tração nas proximidades dos capitéis. Tal fenômeno foi indicado por Khatami et al. (2019) como um efeito decorrente do arqueamento do solo. Segundo os autores, ao formar

o arco de tensões, há um desprendimento da massa de solo abaixo do arco. Ao inserir a camada de geogrelha, nota-se nitidamente um aumento expressivo das zonas de tração demonstrando a contribuição do reforço na formação do arqueamento (Figura 4b). Nota-se ainda que no sistema estaqueado sem geogrelha, as deformações no solo mole são de compressão e maiores que no sistema reforçado com geogrelha (Figura 4b). Nota-se ainda que as tensões não reduzem com a profundidade tal como ocorreu para o modelo reforçado o que ressalta o benefício de usar a geogrelha em aterros estaqueados. Na base do modelo, as deformações reduziram significativamente ao usar a geogrelha.

Ao analisar o modelo sobre colunas (Figuras 4c e 4d), é observado um comportamento bastante distinto em relação ao sistema estaqueado. O modelo sem geogrelha mostrou uma uniformidade de deformações indicando que o fenômeno de arqueamento foi prejudicado. Ao inserir a geogrelha (Figura 4d) as tensões no solo mole reduziram significativamente, muito provavelmente, fruto da mobilização das tensões pelo efeito membrana. É importante destacar que a altura crítica do problema é de 120 mm, o que corresponderia a uma tensão de aproximadamente 30 kPa, considerando a altura crítica como 80% da distância entre capitéis, sem a presença do reforço. Logo, o presente artigo trata de um sistema submetido a uma tensão de 35 kPa. Pela Figura 4a, pode-se afirmar que a altura crítica do sistema sem geogrelhas é maior que a teórica uma vez que se visualizou com exatidão o fenômeno de arqueamento. No entanto, para o modelo de aterros sobre colunas, a altura crítica é inferior a teórica, uma vez que o arqueamento não foi visualizado na Figura 4c.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados deste estudo, fica evidente que os modelos construídos com estacas rígidas e colunas granulares encamisadas demonstraram o comportamento esperado na simulação de aterros sobre solos moles com plataforma de transferência de cargas. Da mesma forma, os solos transparentes exibiram propriedades equivalentes aos solos reais, quando considerado o fator de redução de escala, além de comportamento adequado na simulação desses materiais em modelos em escala reduzida.

Em resumo, a análise dos deslocamentos internos nos solos transparentes, por meio das imagens geradas, possibilitou uma avaliação detalhada do comportamento desses solos e a comparação entre diferentes modelos. Os resultados sugerem que a rigidez do elemento de suporte afeta a transferência de cargas pela PTC, influenciando a quantidade de tensão transmitida para a camada de solo mole. A incorporação da geogrelha como reforço geossintético na plataforma de transferência de cargas resultou em redução de recalques tanto nos modelos GRPS quanto GRCS. Ressalta-se que o reforço mobilizou mais carga de tração nos modelos com estacas rígidas. Portanto, pode-se concluir que a mobilização de cargas de tração pelo reforço geossintético está diretamente relacionada aos recalques diferenciais entre os apoios e o solo mole. Observou-se que a inclusão do reforço foi responsável por enrijecer a PTC e reduzir recalques diferenciais por meio do efeito membrana do geossintético.

De maneira geral, os modelos demonstraram bom desempenho na simulação do problema geotécnico em questão e proporcionaram resultados relevantes para a análise da transferência de tensões em aterros sobre solos moles apoiados em estacas rígidas e colunas granulares encamisadas, bem como para o entendimento da função do reforço geossintético em plataformas de transferência de cargas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa de mestrado e à empresa Huesker do Brasil pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM. (2020). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils (D 4767 – 95). *Astm*, 04(January), 1–15. <https://doi.org/10.1520/D4767-11R20.2>
- Chen, J. F., Guo, X. P., Xue, J. F., & Guo, P. H. (2019). Load behaviour of model strip footings on reinforced transparent soils. *Geosynthetics International*, 26(3), 251–260. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00003>
- Chen, J., Guo, X., Sun, R., Rajesh, S., Jiang, S., & Xue, J. (2021). Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(2), 399–412.

<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.011>

- Deb, K. (2007). Modeling of granular bed-stone column-improved soft soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, 1267–1288. <https://doi.org/10.1002/nag>
- Ding, X., Wu, Q., Huang, Y., & Zhang, Y. (2020). Model test on the soil arching effect of pile-supported embankments using transparent soil. *Geotechnical Testing Journal*, 44(3), 705–721. <https://doi.org/10.1520/GTJ20190347>
- Ezzein, F. M., & Bathurst, R. J. (2011). A transparent sand for geotechnical laboratory modeling. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 590–601. <https://doi.org/10.1520/GTJ103808>
- Gao, J., Liu, L., Zhang, Y., & Xie, X. (2022). Deformation mechanism and soil evolution analysis based on different types geogrid reinforced foundation. *Construction and Building Materials*, 331(March), 127322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127322>
- Gao, J., Xie, X., Lu, Y., & Zhang, Y. (2022). Failure Mechanism Analysis of Reinforced Foundation from Experimental and Numerical Simulations. *KSCE Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0186-2>
- Ghosh, B., Fatahi, B., Khabbaz, H., Nguyen, H. H., & Kelly, R. (2021). Field study and numerical modelling for a road embankment built on soft soil improved with concrete injected columns and geosynthetics reinforced platform. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3), 804–824. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.010>
- Iskander, M., Bathurst, R. J., & Omidvar, M. (2015). Past, Present, and Future of Transparent Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 38(5), 557–573. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150079>
- Liu, J., & Iskander, M. G. (2010). Modelling capacity of transparent soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(4), 451–460. <https://doi.org/10.1139/T09-116>
- Mitchell, J. K. (1981). Soil Improvement: State-of-the-Art Report. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 10, 4, 509–565. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/35/1981_04_0022.pdf
- NBR 16840: Solo — Determinação Do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos, 12 (2021).
- NBR 16843: Solo - Determinação Do Índice de Vazios Mínimo de Solos Não Coesivos, 20 (2020).
- NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica, 16 (2016).
- NBR ISO 10319: Geossintéticos - Ensaio de Tração Faixa Larga, 15 (2013).
- NBR ISO 10321: Geossintéticos - Ensaio de Tração de Emendas Pelo Método Da Faixa Larga, 15 (2013).
- Santos, D. W. M. (2023). *Modelagem física de plataformas de transferência de carga reforçadas com geossintéticos utilizando um sistema estratificado de solos transparentes*. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos.
- Shahu, J. T., Madhav, M. R., & Hayashi, S. (2000). Analysis of soft ground-granular pile-granular mat system. *Computers and Geotechnics*, 27(1), 45–62. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(00\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(00)00004-5)
- Souza, H. P. de, Araújo, G. L. S., & Zornberg, J. G. (2023). Análise Experimental de Colunas Granulares Encamisadas com o Uso de Laponite RD®. In: *Congresso Brasileiro de Geossintéticos*, 9, 214–221.
- Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, D2850 – 15 ASTM International 1 (2015). <https://doi.org/10.1520/D2850-23.2>
- Wu, D., Luo, C., Gao, Z., Li, D., & Xu, C. (2022). Effect of Different Reinforced Load Transfer Platforms on Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankment: Centrifuge Model Test. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(2), 630–649. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0623-7>
- Zhao, L. S., Zhou, W. H., Geng, X., Yuen, K. V., & Fatahi, B. (2019). A closed-form solution for column-supported embankments with geosynthetic reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3), 389–401. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.01.006>