

## EFEITO DO ESPAÇAMENTO ENTRE REFORÇOS NO COMPORTAMENTO DE MUROS EM SOLOS FINOS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS

Paulo Eduardo Oliveira da Rocha

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, [paulo.rocha@geosolucoes.com](mailto:paulo.rocha@geosolucoes.com)

Fernando Henrique Martins Portelinha

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, [fportelinha@ufscar.br](mailto:fportelinha@ufscar.br)

**RESUMO:** Este trabalho foi idealizado para contribuir na avaliação do comportamento de estruturas de contenção em solos reforçados, principalmente no que diz respeito à possíveis deslocamentos de face, relacionados ao espaçamento vertical entre reforços projetado. As informações apresentadas são baseadas na construção e análise de um protótipo em escala real, dividido em dois módulos de diferentes quantidades de geogrelhas, mas com um mesmo somatório de resistências, construído com solo fino, argiloso e coesivo. Ambos os módulos da estrutura foram submetidos à sobrecarga máxima de 120 kPa, aplicadas em estágios de 20 kPa, com os deslocamentos de face avaliados através de instrumentação externa. A maior quantidade de reforços resultou em uma estrutura com deslocamentos máximos de face 40% menores que uma estrutura com menor quantidade de geogrelhas, mas com mesmo somatório de resistências, validando o conceito de GRS-IBS, construído com solos finos argilosos, tipicamente brasileiros. Os resultados obtidos demonstraram que a adoção de menores espaçamentos verticais entre reforços pode ser considerada uma estratégia interessante na redução de deslocamentos de face em estruturas de contenção em solo reforçado com geossintéticos, e deve ser amplamente estudada, para que seja alcançados valores ideais, em função das características dos solos e dos reforços utilizados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Contenção, Solo Reforçado, Geossintético, Geogrelha, Solos finos.

**ABSTRACT:** This work was designed to contribute to the evaluation of the behavior of containment structures in reinforced soils, mainly about possible face displacements, related to the vertical spacing between projected reinforcements. The information present came through the construction and analysis of a full-scale prototype, divided in two modules with different quantities of geogrids, but with the same sum of resistance, built with fine, clayey and cohesive soil. Both modules of the structure were subjected to a maximum overload of 120 kPa, applied in stages of 20 kPa, with face displacements assessed using external instrumentation. The greater number of reinforcements resulted in a structure with maximum face displacements 40% smaller than a structure with a smaller number of geogrids, but with the same sum of resistances, validating the concept of GRS-IBS, built with fine clayey soils, typically Brazilian. The results obtained demonstrated that the adoption of smaller vertical spacings between reinforcements can be considered an interesting strategy for reducing face displacements in containment structures in soil reinforced with geosynthetics, and should be widely studied, so that ideal values can be achieved, depending on the characteristics of the soils and reinforcements used.

**KEYWORDS:** Retaining Wall; MSEW; Geosynthetics; Geogrid, Cohesive Soil.

### 1 INTRODUÇÃO

As Estruturas em Solo Reforçado com Geossintéticos (ESR), do inglês Geosynthetic Reinforced Soil (GRS), também chamadas de Muros Mecanicamente Estabilizados, do inglês *Mechanically Stabilized Earth Wall* (MSEW), são formadas basicamente por quatro elementos: o solo, reforços, faceamento e drenagem.

Embora estas estruturas apresentem constante evolução, alguns aspectos oriundos de certas combinações destes quatro elementos ainda se encontram pouco exploradas, como por exemplo os níveis de deslocamentos e ou deformações de face dos muros em solo reforçado, em função do espaçamento vertical adotado entre os reforços, com solos finos e geogrelhas.

Grande parte da bibliografia relativa a estas questões, muito baseada em modelagens numéricas, e em estruturas construídas com solos granulares, não se estabelece com segurança, qual seria a exata relação entre os espaçamentos verticais entre reforços e os níveis de deslocamentos apresentados pelas estruturas.

Diante deste cenário, este trabalho foi idealizado para contribuir na avaliação do comportamento de estruturas de contenção com diferentes espaçamentos verticais, através da construção e análise de um protótipo de Estrutura em Solo Reforçado com Geossintético dividido em dois módulos de diferentes configurações, mas todo construído com solo fino, argiloso e coesivo.

## 2 ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

### 2.1 Estruturas de Contenção em Solo Reforçado

Estruturas de contenção, também chamadas de muros de arrimo, são obras civis construídas com a finalidade de prover estabilidade contra a ruptura de maciços de terra ou rocha (Barros, 2010).

De acordo com Vilar e Bueno (2004), as estruturas de contenção podem proporcionar estabilidade através de diferentes maneiras, e assim podem ser classificadas como muros de arrimo de gravidade, gravidade aliviada, muros de flexão, muros de contraforte, cortinas de contenção, paredes diafragma.

Vertematti et al. (2004), Benjamim (2006) e Palmeira (2018) destacam que a técnica de reforço de solos pela inclusão de materiais é bastante antiga, sendo ainda hoje possível a observação de vestígios e até obras completas em bom estado, construídas séculos atrás, a exemplo dos *ziggurats*, na antiga Mesopotâmia, algumas partes da muralha da china, e templos incas nos topos das montanhas dos Andes.

### 2.2 Estruturas de Contenção em Solo Reforçado com Geossintéticos

Dentre os geossintéticos mais utilizados na confecção de estruturas de contenção em solo reforçado estão as geogrelhas, as geotiras, e os geotêxteis tecidos e não tecidos (SAYÃO et al. 2015).

As principais vantagens das geogrelhas são sua melhor interação com o aterro, o que garante um melhor intertravamento com o solo, maior rigidez, quando comparada à geotêxteis, resultando em menores valores de alongamento para mesmos níveis de tensão (BENJAMIM, 2006).

No Brasil, a maioria absoluta das contenções em solo reforçado com geossintéticos, principalmente as de grande altura, são construídas com uso de geogrelhas tecidas, sendo exemplos destas estruturas, o grupo de contenções executadas na cidade de Cajamar, no estado de São Paulo, entre os anos de 2020 e 2021, com paramento frontal em telas metálicas (ROCHA, et al., 2022a) e placas de concreto de pequeno porte (ROCHA, et al. 2022b).



Figura 1. Estruturas de contenções reforçadas com geogrelhas na cidade de Cajamar SP em 2021.

Fonte: Rocha et al. (2022a) e Rocha et al. (2022b).

### 2.3 Previsão de deslocamentos em Estruturas de Contenção em Solo Reforçado com Geossintéticos

A previsão dos deslocamentos e deformações de estruturas de contenção em solo reforçado ainda é uma tarefa difícil, principalmente pelo grande número de variáveis que permeiam essa análise, tais quais a rigidez da face adotada, propriedades do solo de aterro, e logicamente as questões relacionadas aos reforços utilizados, incluindo a relação espaçamento vertical e resistência à tração.

De acordo com Palmeira (2018), observações de estruturas reais têm mostrado deslocamentos horizontais nas faces de muros reforçados variando entre 0,3% e 3% da altura do muro, mas tipicamente inferiores a 1,2% da altura do muro. A título de exemplo, muros com 10 m de altura apresentariam deslocamentos horizontais na face entre 0,1 e 30 cm, sendo os valores típicos observados em obras da ordem de 12 cm.

Entre alguns dos métodos analíticos utilizados para a previsão de deslocamentos de face em estruturas de contenção em solo reforçado, vale destacar o método apresentado pela FHWA (1990) por sua simplicidade e consequente fácil aplicação, porém, vale destacar que o método não considera o número de reforços existentes na contenção, tal qual o espaçamento vertical entre eles, sendo um resultado bastante genérico.

### 2.4 Previsão de deslocamentos por modelagens numéricas

No âmbito de projetos e obras de contenções em solo reforçado com geossintéticos, é comum a realização da previsão de deslocamentos e deformações com uso de softwares dotados de método dos elementos finitos, e mais recentemente método dos elementos discretos, geralmente apresentando resultados “aceitáveis”, quando comparados aos valores medidos em campo por instrumentação e ou equipe de topografia.

Plácido et al. (2012) realizaram modelagens numéricas onde além da variação dos espaçamentos verticais entre reforços, também foram diversificados os tipos de geossintéticos utilizados como reforços, destacando que os resultados das análises numéricas mostraram que mesmo muros reforçados com geotêxteis, com baixos valores de espaçamento entre as camadas, apresentaram comportamento tão satisfatório quanto os muros reforçados com geogrelhas e elevados espaçamentos entre inclusões.

Mafia (2020) concluiu que o uso de espaçamentos reduzidos, com reforços de rigidez equivalente, mostra melhoria no comportamento da estrutura, tal como a de uso de reforços mais rígidos com grandes espaçamentos, porém com níveis de cargas mobilizadas menores.

A pesquisa de Mafia (2020) foi realizada com foco em estruturas de solos reforçados aplicados aos encontros de pontes, onde possuem a finalidade de suportar não só o maciço terroso, como também as elevadas cargas provenientes da superestrutura. Essas estruturas têm sido aplicadas com espaçamento reduzidos em relação a técnica convencionais de muros em solo reforçados não portantes, e tem sido chamada de GRS IBS.

### 2.4 GRS

Nos últimos anos um novo conceito derivado das estruturas de contenção em solo reforçado com geossintéticos foi desenvolvido, o GRS, sigla em inglês para *Geosynthetic Reinforced Soil*, que pode ser traduzido como Solo Reforçado com Geossintético.

O método GRS foi desenvolvido a partir de estruturas em solo reforçado com pequenos espaçamentos verticais entre geossintéticos, reconhecendo que a diminuição na distância entre reforços proporciona maior confinamento, redução da deformação lateral, dilatação suprimida e redução das tensões de conexão entre o reforço e a face (FHWA, 2012).

Para Zornberg et al. (2019) o aumento na densidade de reforços resulta em um melhor desempenho geral da estrutura construída, sendo este método especificamente desenvolvido para apoio e proteção de pontes, pois nestas aplicações as vantagens observadas em relação a sistemas convencionais são ainda mais destacáveis, o que inclusive possibilita uma substituição rápida e simples em estruturas de pontes menores.

O conceito foi desenvolvido e está sendo utilizado em projetos nos Estados Unidos, em sua maior parte, senão em sua totalidade, em estruturas construídas com solo granular, sendo um dos objetivos deste trabalho realizar uma aproximação entre essa modalidade e o solo fino e coesivo, tipicamente brasileiro, através das análises realizadas em um modelo físico construído em escala real.

### 3 MODELO FÍSICO EM ESCALA REAL

Este trabalho é baseado em uma pesquisa realizada com protótipo de muro de contenção em solo reforçado executado em escala real, com 2 m de altura, com propriedades e processo executivo ligeiramente adaptados em relação a condições reais de obras, com leituras de deslocamentos e tensões através de instrumentação instalada junto à estrutura.

O programa experimental foi conduzido dentro do Departamento de Estruturas e Geotecnia da UFSCar, na cidade de São Carlos SP, contemplando uma estrutura de contenção em solo reforçado com geogrelhas, de 2 m de altura, 3,4 m de largura total, e 1,35 m de profundidade útil, estruturada por um container metálico, subdividido em 4 diferentes módulos, possibilitando a construção de 4 diferentes configurações de estrutura, com os módulos 1 e 2 sendo objeto de estudo deste trabalho.

A altura adotada emula de forma direta um muro com 2 m, o comprimento dos reforços se enquadra nas recomendações existentes na BS 8006 (1995), assim como na ABNT NBR 16920 (2021), enquanto que a largura foi adotada de forma suficiente para que a restrição lateral não afetasse os resultados obtidos na instrumentação, aplicada na faixa central de cada protótipo.

A Figura 2 apresenta um desenho esquemático das duas configurações consideradas neste trabalho, em termos de localização dos reforços e posição da face em blocos de concreto, enquanto a Figura 3 apresenta uma foto do protótipo finalizado, pronto para receber a aplicação das sobrecargas previstas.

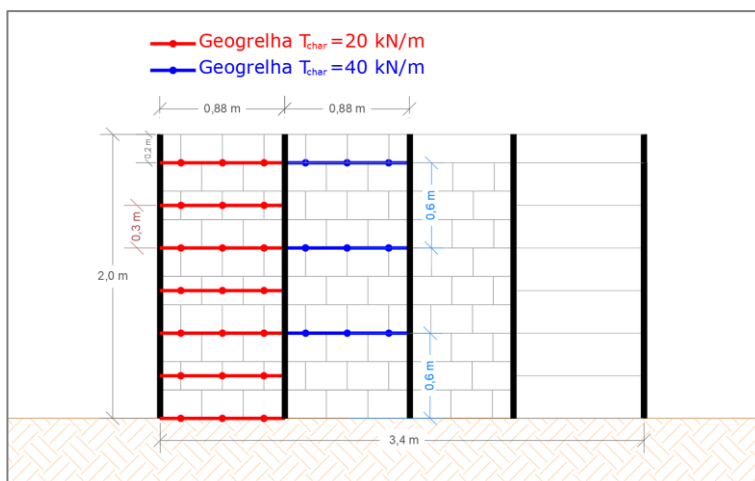


Figura 2. Vista frontal dos módulos 1 e 2 do protótipo analisado.



Figura 3. Protótipo finalizado com 4 diferentes configurações construtivas.

O protótipo foi construído com solo fino, trazido de Santa Gertrudes, cidade localizada a aproximadamente 70 km de São Carlos, com características similares ao encontrado na região, de cor avermelhada e apresentando coesão quando pressionado manualmente.

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria, com peneiramento grosso, fino e sedimentação, demonstraram que o material é composto de aproximadamente 8% de areia fina, 38% de silte e 54% de argila, sem a presença significativa dos demais materiais, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição granulométrica do solo utilizado no experimento.

ARGILA	SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
		FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO
< 0,002 mm	0,002 - 0,06 mm	0,06 - 0,20 mm	0,20 - 0,60 mm	0,60 - 2,0 mm	2,0 - 6,0 mm	6,0 - 20 mm	20 - 60 mm
53,59%	37,74%	8,11%	0,56%	0%	0%	0%	0%

O índice de plasticidade (IP) do material compactado foi de 13,7%, com limite de liquidez (LL) de 50% e limite de plasticidade (LP) de 36,3%. O índice de vazios (e) apresentado pelo solo compactado foi de 0,967 e grau de saturação (Sr) de 85%. Todos os ensaios de caracterização e obtenção de índices físicos do solo foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da Universidade Federal de São Carlos, em acordo com a norma de cada um dos ensaios.

O protótipo foi compactado manualmente com apiloamento, em camadas finalizadas de 15 cm, e o controle do grau de compactação foi realizado em cada uma destas camadas.

Os reforços geossintéticos utilizados no experimento foram geogrelhas tecidas, de poliéster, gentilmente cedidas pelas Geo Soluções | *Strata Company*, de denominação Strata Grid, sendo que parte destas geogrelhas tiveram sua resistência à tração reduzida, para permitir maiores níveis de deformação junto à face das estruturas, e assim exaltar a diferença de comportamento entre os setores analisados.

Tal técnica foi adotada visto que as menores resistências à tração das geogrelhas comercializadas no Brasil, e assim disponíveis para a pesquisa, seriam de 40 kN/m, o que para um muro de apenas 2 m de altura, com disposição de reforços a cada 30 cm de altura, tornaria a sobrecarga necessária para a promoção de deslocamentos perceptíveis algo impossível de ser realizado.

Desse modo, foram preparados painéis de geogrelhas com resistências reduzidas através do corte e remoção de metade de seus elementos longitudinais, reduzindo-se assim sua resistência à tração característica, longitudinal, a 50% do valor inicial, obtendo-se um material de 20 kN/m.

Os painéis de geogrelhas preparados foram avaliados através de ensaios de resistência à tração, realizados em conformidade com a norma americana ASTM D 6637 (2015).

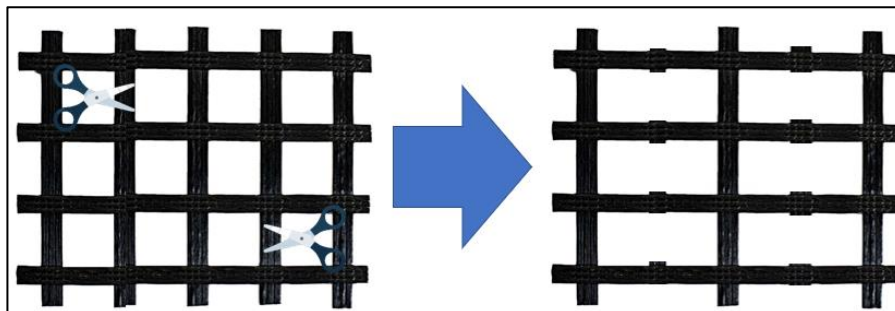


Figura 5. Detalhe da preparação de reforço para obtenção de resistência especificada.

Foi aplicada instrumentação externa ao aterro reforçado, através da utilização de medidores de deslocamentos horizontais na face dos protótipos, construídos através da fixação de barras verticais, perfuradas, junto à estrutura metálica confinante do experimento, e demarcações nos blocos coincidentes destes furos, permitindo assim a medida direta da distância para com a face externa dos blocos de concreto utilizados como faceamento do experimento, ao longo da aplicação dos níveis de sobrecarga impostos.

As Figuras 6 e 7 apresentam a instrumentação utilizada para avaliação dos protótipos.

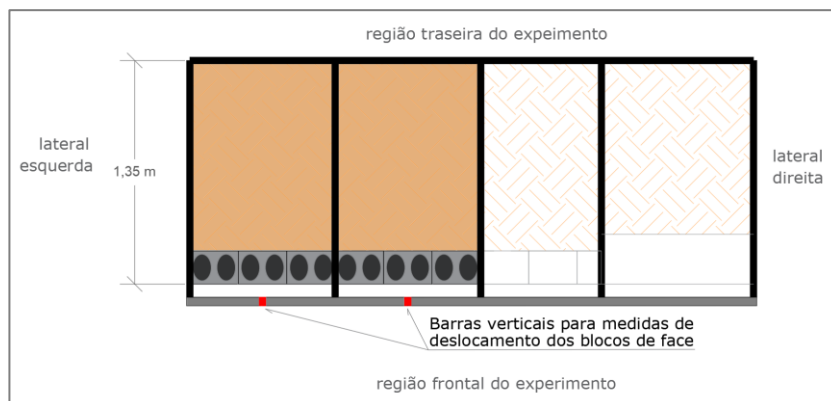


Figura 6 - Sistema de avaliação de deformações e deslocamentos na face (planta).

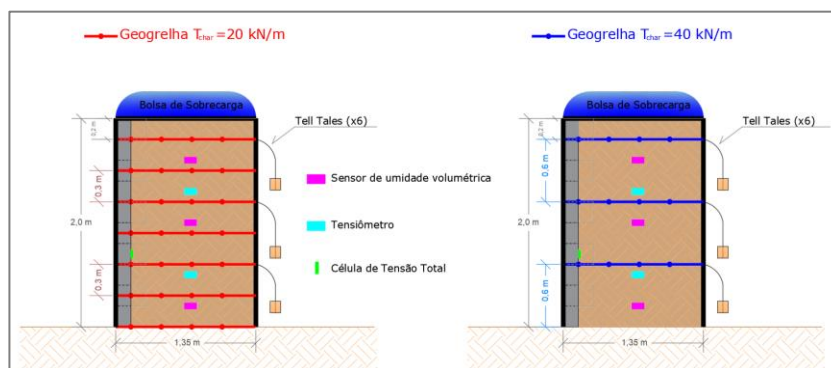


Figura 7 – Instrumentação dos protótipos 1 e 2 (seções transversais).

#### 4 PROCEDIMENTO DE ENSAIO E RESULTADOS OBTIDOS

As estruturas foram submetidas à sobrecarga máxima de 120 kPa, aplicadas em estágios de 20 kPa, através de bolsas flexíveis de ar, fixadas à estrutura metálica que confina o experimento, em forma de viga de reação, com cada nível de carga sendo mantido por um intervalo aproximado de 2 dias, onde foram realizadas leituras da instrumentação, imediatamente após a estabilização da sobrecarga, 1 dia após esse período, e imediatamente antes da mudança para o novo nível.

Os deslocamentos de face foram avaliados através da instrumentação externa, com medidas realizadas por paquímetro de precisão adequada, através das perfurações presentes nas barras verticais instaladas junto à estrutura do experimento, nos sete pontos de interesse, previamente estabelecidos junto a cada um dos dois módulos avaliados.

Através dos valores de deslocamentos de face mensurados nos módulos 1 e 2, foi possível a elaboração dos gráficos detalhados apresentados na Figura 7, e o comparativo entre os deslocamentos máximos apresentado na Figura 8.

Em ambos os módulos é possível observar que a estrutura reforçada se comportou como um muro rígido, apresentando deslocamentos positivos nos dois terços mais baixos, formando uma “barriga”, enquanto o terço superior deslocou-se para dentro da própria estrutura, como se ouvera sido puxado pela aplicação da sobrecarga vertical, porém, vale destacar que este comportamento ocorreu na contenção 01, com um maior número de reforços, apenas com cargas superiores a 60 kPa, enquanto a contenção 02 apresentou tal comportamento desde as primeiras cargas de 20 kPa.

Os maiores deslocamentos ocorreram quando aplicados os maiores níveis de sobrecarga, inclusive os deslocamentos negativos no terço superior da estrutura.

O deslocamento máximo da contenção 02, com menor número de reforços, foi de 2,8 mm, e ocorreu na entre as cotas 60 e 80 cm da estrutura, durante a aplicação de sobrecarga de 120 kPa. O deslocamento máximo da contenção 01, com maior número de reforços, foi de 1,95 mm, na cota de 120 mm, durante a aplicação de sobrecarga de 100 kPa.

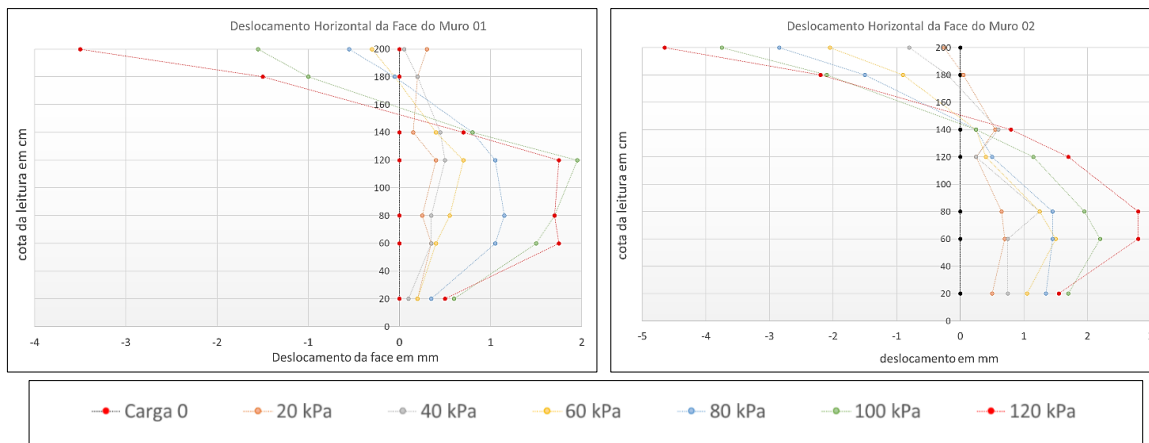


Figura 7 – Deslocamentos horizontais nas faces dos módulo 1 e 2 do protótipo.

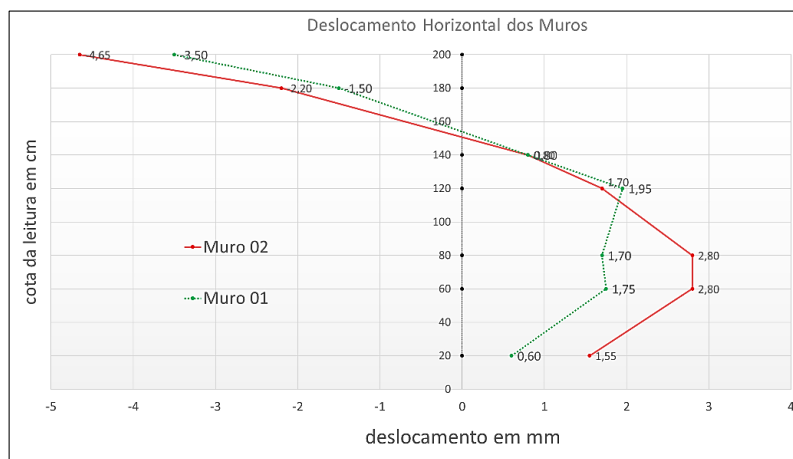


Figura 8 – Deslocamentos horizontais máximos nas faces dos módulo 1 e 2 do protótipo.

## 5 CONCLUSÃO

Os comportamentos das estruturas foram similares ao que se observa em estruturas de contenção em solo reforçado executadas com solos similares ao utilizado nos protótipos, tais quais os apresentados por ROCHA et al. (2022a) e ROCHA et al. (2022b), validando assim a metodologia da pesquisa e consequentemente dos resultados obtidos por ela.

Os deslocamentos se mostraram relativamente pequenos em relação às dimensões das estruturas, inclusive quando comparados aos métodos de previsão de deslocamentos apresentados no artigo, sendo a elevada coesão do solo utilizada um dos pontos apontados como resultado deste comportamento, principalmente pelo fato dos métodos de previsão terem sido elaborados com base em solos granulares.

A maior quantidade de reforços resultou em uma estrutura com deslocamentos máximos de face 40% menores que uma estrutura com menor quantidade de geogrelhas, mas com mesmo somatório de resistências, validando o conceito de GRS-IBS, construído com solos finos argilosos, tipicamente brasileiros.

Os resultados obtidos permitem a modelagem de estruturas de diferentes dimensões das avaliadas no experimento, possibilitando a continuidade da pesquisa de forma computacional, com variações de reforços, geometria e níveis de sobrecarga.

De acordo com os resultados obtidos, a adoção de menores espaçamentos verticais entre reforços se mostrou uma estratégia interessante na redução de deslocamentos de face em estruturas de contenção em solo reforçado com geossintéticos, e deve ser amplamente estudada, para que seja alcançados valores ideias, em função das características dos solos e dos reforços utilizados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de reconhecer todo o apoio que tiveram dos colegas de GEGEOS, da UFSCar, e da empresa Geo Soluções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, P.R., Vertematti, j.c., Manual Brasileiro de Geossintéticos: Aplicações em Drenagem, 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2015.
- American Society for Testing and Materials. D6637 Standard Test Method for Determining Tensile properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method. USA. 2015.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16920 Muros e taludes em solos reforçados - Parte 1: Solos reforçados em aterros. Brasil. 2021.
- Barros, P. L. A., Obras de Contenção: Manual Técnico, 2ª edição. Campinas: Maccaferri, 2010.
- Benjamin, C. V. S. Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil. 2006. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BSI – British Standards Institution (1995): “BS 8006 – Code of Practice for Strengthened / Reinforced Soils and other fills”, London, UK.
- FHWA. Federal Highway Administration, US Department of Transportation. Reinforced Soil Structures: Design and Construction Guidelines. Virginia, USA: US Department of Transportation, 1990. V.1.
- FHWA. Federal Highway Administration, US Department of Transportation. Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System Interim Implementation Guide. FHWA-HRt-11-026; June 2012.
- Mafia, G. A. Estudo da distribuição dos reforços em muros portantes de solos reforçados com geossintéticos. 2020. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2020.
- Palmeira, E.N. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.
- Plácido, R. R., futai, M. M., kamiji, T. S. M. M., Avaliação do efeito da geometria interna no comportamento de muros reforçados com geossintéticos utilizando o método dos elementos finitos, In: congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, XVI, 2012, Porto de galinhas, 2012.
- Rocha, P.E.O., Estruturas em Solo Reforçado com face em tela metálica em obra de grande porte em Cajamar – SP. In: congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, xx, 2022, Campinas, 2022.
- Rocha, P.E.O., Estruturas em Solo Reforçado com face em placas de concreto de pequenas dimensões em obra de grande porte em Cajamar - SP. In: congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, XX, Campinas, 2022.
- Vilar, O. M., Bueno B. S., Mecânica dos Solos: Vol. 2, 1ª edição. São Carlos / Viçosa, 1979.
- Zornberg, J. G. et al. Proposed Refinements to Design Procedures for Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Structures in AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. [s.l.] National Academies Press, 2019.