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/COBRAMSEG2026.4/62

Efeito do Espaçamento entre Reforços no Comportamento de Muros de Solos Finos Reforçados com Geogrelhas

Paulo Eduardo Oliveira da Rocha
Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, paulo.rocha@geosolucoes.com

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

RESUMO: Para demonstrar que menores espaçamentos verticais resultam em estruturas mais homogêneas, com menores deslocamentos, mesmo com aterros compostos por solos finos e coesivos, foi realizada a construção instrumentada de 2 protótipos em escala real, com 2 m de altura, com aterro formado por solo fino, com coesão de 33,2 kPa na umidade ótima, instrumentadas com extensores mecânicos, e medidores de deslocamento de face, com o Muro 01 construído com 6 geogrelhas de 20 kN/m, espaçadas a cada 30 cm, e o Muro 2 com 3 geogrelhas de 40 kN/m espaçadas a cada 60 cm. As estruturas foram submetidas a sobrecargas de 20 até 120 kPa. Os reforços do Muro 01, apresentaram deformações máximas sobre uma faixa que atravessava todo o maciço, similar a superfície de ruptura de Rankine, e o Muro 02 apresentou deformações máximas na região de sua face, indicando um maior nível de tensão nessa área, considerada crítica para estruturas em solo reforçado. Os resultados mostraram a utilização de menores espaçamentos verticais entre reforços, foi capaz de promover redução de deslocamentos de face, e consequentemente possibilitar a construção de estruturas mais rígidas e homogêneas.

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

ABSTRACT: To demonstrate that smaller vertical spacing results in more homogeneous structures with smaller displacements, even when embankments are composed of fine and cohesive soils, the instrumented construction of two full-scale prototypes, 2 m high, was carried out. The embankments were made of fine soil with a cohesion of 33.2 kPa at optimum moisture content and were instrumented with mechanical extensometers and face displacement gauges, with Wall 01 built with six geogrids of 20 kN/m, spaced every 30 cm, and Wall 02 with three geogrids of 40 kN/m, spaced every 60 cm. The structures were subjected to surcharge loads ranging from 20 to 120 kPa. The reinforcements of Wall 01 exhibited maximum strains along a band crossing the entire reinforced mass, similar to Rankine's failure surface, whereas Wall 02 showed maximum strains in the facing region, indicating a higher stress level in this area, considered critical for reinforced soil structures. The results showed that the use of smaller vertical spacing between reinforcements was able to reduce facing displacements and, consequently, enable the construction of stiffer and more homogeneous structures.

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

1 INTRODUÇÃO

O uso de espaçamentos reduzidos não convencionais (Sv < 30 cm) tem sido amplamente utilizado em sistemas reforçados para suporte de pontes rodoviárias em diversos países do mundo. O uso de espaçamento de 20 cm em solo granular é comprovadamente eficiente na redução significativa da deformabilidade do sistema reforçado comparativamente aos sistemas convencionais (Adams et. al 2011).

Através de um estudo experimental, construído com solo arenoso, mal graduado, Leshchinsky et al. (1994) demonstraram que em estruturas construídas com reforços de resistência e rigidez típicas, espaçamentos verticais reduzidos influenciam a rigidez da massa de solo reforçado, deslocando as possíveis superfícies de ruptura para fora da região reforçada. Leshchinsky e Vulova (2001) conduziram um estudo sobre os efeitos dos espaçamentos verticais entre reforços, utilizando métodos de elementos finitos, com os resultados obtidos

demonstrando que os efeitos obtidos por espaçamentos reduzidos aumentam conforme aumenta a resistência ao cisalhamento do solo utilizado no aterro estrutural. Os mesmos autores demonstram que para espaçamentos verticais menores que 20 cm, a massa de solo reforçada se comporta de forma coesa, e não apresenta regiões de plastificação interna, ao que em contrapartida, espaçamentos maiores que 60 cm, levaram a falhas de conexão junto à face das estruturas. Morsy et. al. (2017) demonstraram através da integração de resultados obtidos em avaliações de campo e experimentais, complementadas com modelagens numéricas, que o solo confinado entre camadas de reforços subsequentes atua como um bloco monolítico, e de forma geral, o efeito do espaçamento vertical dos reforços tem impacto relevante no comportamento das estruturas de contenção em solo reforçado com geossintéticos, embora, segundo o autor, este fator não seja muitas vezes considerado em projeto.

Os mecanismos envolvidos na melhoria da deformabilidade foram relatados por Wu (2019) como sendo um efeito compósito que promove maior confinamento às linhas de reforços. De forma semelhante, Morsy et al. (2019) descreve que existe uma interação entres as linhas de reforços quando mobilizados promovendo a supressão da dilatância do solo granular e, consequentemente, maior confinamento. Tal mecanismos tende a ser mais intenso em solos granulares.

No contexto brasileiro, temos a prática de utilizar solos locais lateríticos para compor muros e taludes reforçados que exigem maior atenção técnica principalmente pela oscilação do comportamento desse tipo de solo quando em contato com água. O presente estudo avalia o efeito de redução de espaçamento entre reforços, em um modelo de larga-escala de solo reforçado com geogrelhas, e solo local fino, na busca de quantificar se o espaçamento reduzido pode melhorar a deformabilidade desse tipo de estrutura.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Modelo físico em escala real

Este trabalho é baseado em uma pesquisa realizada com protótipos de muro de solo reforçado com geossintéticos executados em escala real e em ambiente de laboratório, com 2 m de altura, com propriedades e processo executivo ligeiramente adaptados em relação a condições reais de obras, com leituras de deslocamentos totais externos da face, deslocamentos totais internos na interface bloco solo, e deslocamentos totais dos reforços, através de instrumentação instalada junto à estrutura.

O programa experimental foi conduzido dentro do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, na cidade de São Carlos SP, contemplando uma estrutura de contenção em solo reforçado com geogrelhas, com 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 muros.

Neste trabalho em específico foram avaliados apenas os módulos 1 e 2, construídos com diferentes combinações de espaçamento e resistência à tração dos reforços, mas com mesma soma de valores finais, sendo o módulo 1 construído com 6 geogrelhas de 20 kN/m, espaçadas a cada 30 cm, e o módulo 2 construído com 3 geogrelhas de 40 kN/m, espaçadas a cada 60 cm, ambos com faceamento em blocos de concreto.

A Figura 1 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 2 apresenta uma foto do protótipo finalizado, pronto para receber a aplicação das sobrecargas previstas.

O protótipo analisado foi construído com inclinação de face de 1% (um por cento), com cada bloco de concreto, de 200 mm de altura, assentado com um espaçamento de 2 mm em relação ao bloco inferior, ou seja, a face foi executada com degraus horizontais de 2 mm entre blocos, que ao final da construção, geraram uma diferença de 20 mm entre o alinhamento do pé e de topo dos muros.

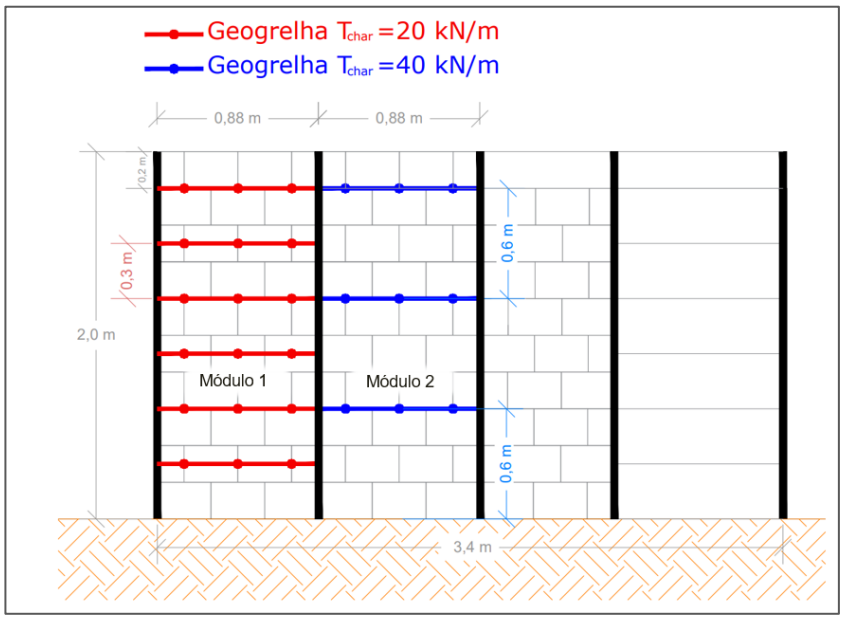


Figura 1. Vista frontal dos módulos 1 e 2 do protótipo analisado.



Figura 2. Protótipo finalizado com 4 diferentes configurações construtivas.

O faceamento das estruturas avaliadas, protótipos 1 e 2, foi composto por blocos de concreto preenchidos com brita, de modo a garantir a ancoragem dos reforços e travamento de face, além de facilitar a medição dos deslocamentos.

2.2 Solo de Aterro

O protótipo foi construído com solo fino, trazido da cidade de Santa Gertrudes, localizada a aproximadamente 70 km de São Carlos, com características típicas da região, com cor avermelhada e coesão elevada. 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.

Os índices físicos do solo, tal qual sua curva de compactação, foram obtidos por ensaio tipo proctor normal, de acordo com a norma ABNT NBR 7182, realizado com soquete pequeno, e energia de Proctor normal (583 kJ/m3), onde se almejava um grau de compactação de 95%, resultando em um peso específico seco máximo de 1,46 g/cm3 com umidade ótima de 29%, índice de vazios de 0,92 e grau de saturação de 88,47%.

2.3 Reforços Geossintéticos

Os reforços geossintéticos utilizados no experimento foram geogrelhas tecidas, de poliéster, de denominação StrataGrid, fornecidas pela empresa Geo Soluções, sendo que parte destas geogrelhas tiveram sua resistência à tração reduzida, de 40 kN/m para 20 kN/m, através do corte e retirada de metade dos elementos longitudinais componentes dos geossintéticos.

A tabela 1 apresenta de forma resumida as propriedades obtidas através da análise dos resultados dos ensaios de resistência à tração realizados com as geogrelhas intactas e reduzidas.

Através da análise dos resultados de ensaios de tração dos reforços, pode-se observar que, a taxa de aumento de resistência inicial das geogrelhas, na faixa de alongamento que vai de 1% a 5%, denominada Δe1-5%, para a geogrelha intacta é de aproximadamente 3 kN/m para cada 1% de alongamento, e da geogrelha reduzida é de aproximadamente 2 kN/m para cada 1% de alongamento.

A mesma taxa calculada para uma faixa mais avançada do alongamento, considerando por exemplo possíveis alongamentos sofridos durante a compactação do solo de aterro, na faixa entre 5% e 9%, denominada Δe5-9%, para a geogrelha intacta foi de aproximadamente 4 kN/m, enquanto na geogrelha reduzida foi de aproximadamente 3 kN/m.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de resistência à tração das geogrelhas.

	Módulo 1	Módulo 2
	Geogrelha reduzida	**Geogrelha Intacta**
Tração na ruptura estimada (kN/m)	20	40
Tração na ruptura ensaiada (kN/m)	21,7	43,8
Alongamento na ruptura (%)	8,1	11,7
Módulo de Rigidez na ruptura (kN/m)	**268**	**374**
Tração à 2% do alongamento (kN/m)	4,9	7,5
Módulo de Rigidez à 2% (kN/m)	**245**	**375**
$\Delta e_{1\text{-}5\%}$ [(kN/m)/1%]	**2**	**3**
Tração à 7% do alongamento (kN/m)	15,0	23,9
Módulo de Rigidez à 7% (kN/m)	**214**	**341**
$\Delta e_{5\text{-}9\%}$ [(kN/m)/1%]	**3**	**4**

2.4 Instrumentação

Cada um dos módulos avaliados conta com a presença de 7 extensômetros, tipo tell tales, utilizados para a realização de deslocamentos pontuais dos reforços, e consequentemente análises de deformação e resistência à tração mobilizada pelos reforços.

Os extensômetros foram aplicados em cada camada de reforço, espaçados a cada 20 cm, a partir da face da estrutura, com exceção dos TT0 na face externa dos Muros, e os TT01 na face interna do bloco de fechamento, distante assim 15 cm do anterior, aplicados para permitir a medição de deslocamentos pontuais dos reforços aplicados, e consequentemente permitir análises do comportamento das geogrelhas, além dos cálculos das deformações e trações máximas mobilizadas.

Também foi adotada 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, e assim como com os extensômetros, os deslocamentos de face foram medidos com uso de LVDTs (faixa de 0 a 50 mm, resolução de 0,05 mm, precisão ± 0,1 mm).

2.5 Procedimento de ensaio

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. Cada nível de carga foi mantido por um intervalo de 2 dias, onde foram realizadas leituras da instrumentação interna e externa ao protótipo, imediatamente após a estabilização da sobrecarga, um 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 igual a 0,1 mm, 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.

3 RESULTADOS

3.1 Deslocamentos externos na face após a sobrecarga

A Figura 3 apresenta os deslocamentos externos isolados medidos nas faces dos Muros, já desprezados os deslocamentos construtivos, após a aplicação das sobrecargas previstas.

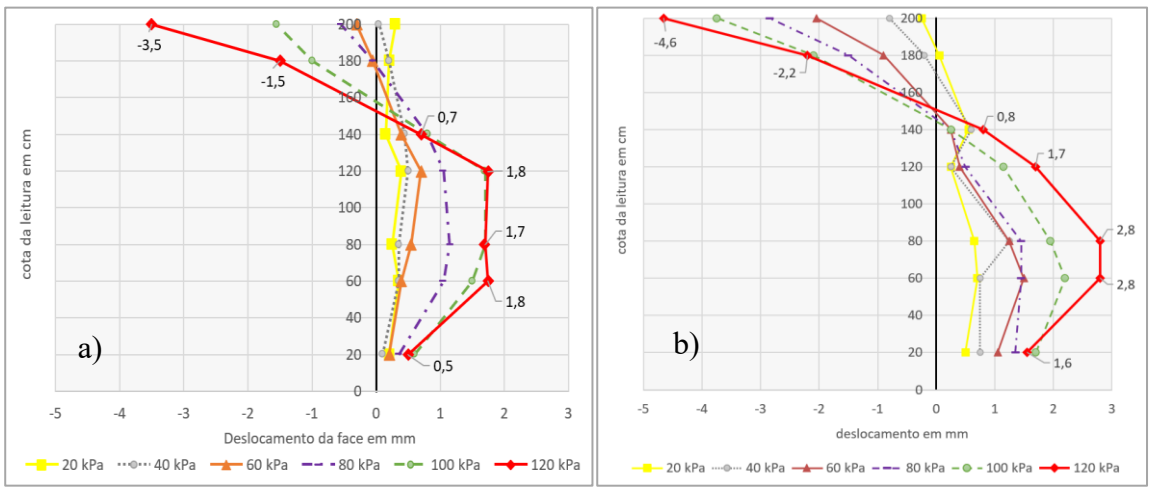


Figura 3. Deslocamentos externos na face dos Muros: a) Muro 01; b) Muro 02.

Os deslocamentos da face para dentro do corpo do aterro, do Muro 02, construído com 3 reforços de 40 kN/m, com espaçamento vertical de 60 cm, foram aproximadamente 55% maiores que no Muro 01, construído com 6 reforços de 20 kN/m, com espaçamento vertical de 30 cm. Os deslocamentos para fora da face do Muro 02, construído com 3 reforços de 40 kN/m, com espaçamento vertical de 60 cm foram cerca de 33% maiores que no Muro 01, construído com 6 reforços de 20 kN/m, com espaçamento vertical de 30 cm.

3.2 Deslocamentos dos extensômetros tipo tell tales

Para a representação do comportamento dos tell tales após a aplicação das sobrecargas, foi idealizado modelo gráfico, com a seção principal dos muros, incluindo indicação da posição inicial dos blocos, geogrelhas e instrumentação, fazendo uso de setas indicadoras de movimento do ponto avaliado.

As setas vermelhas, apontadas para a esquerda, representam uma elevação do peso metálico componente do extensômetro tipo tell tale, enquanto as setas azuis, apontadas para a direita, representam uma movimentação dos pesos para baixo. Os valores indicados junto às setas representam a movimentação medida, em milímetros, realizadas na interface do peso componente da instrumentação, junto ao gabarito fixado na parte traseira do protótipo.

A Figura 4 apresenta as seções tipo dos Muros 01 e 02, com geogrelhas instrumentadas em destaques, além dos deslocamentos medidos pelos tell tales após a aplicação de sobrecargas de 20 kPa e 120 kPa.

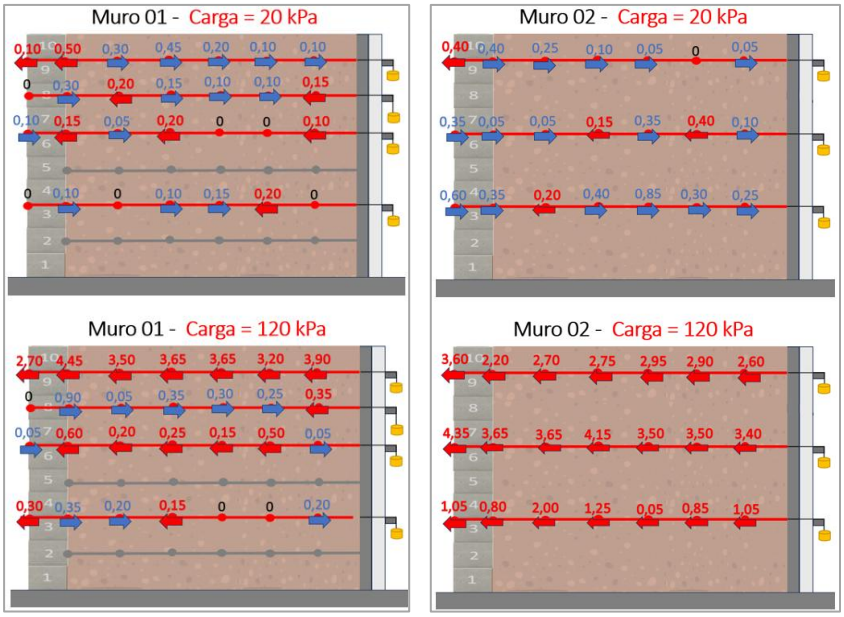


Figura 4. Deslocamentos em mm, dos tell tales dos Muros 01 e 02, após diferentes sobrecargas.

De maneira geral, os deslocamentos dos tell tales é bastante condizente com os deslocamentos da face do Muro 01, com movimentos para a direita após a carga de 20 kPa, inversão da direção, ao menos na região próxima ao topo da estrutura, com 60 kPa, e intensificação destes deslocamentos após a aplicação de 120 kPa.

Os deslocamentos dos tell tales do Muro 02 foram condizentes com os deslocamentos de sua face. Os tell tales do Muro 02 mostram movimentos para a direita após a carga de 20 kPa, inversão da direção na região central da estrutura, com 60 kPa, e intensificação de todos os deslocamentos após 120 kPa.

3.3 Deformações nas geogrelhas

A partir dos deslocamentos avaliados pelos extensômetros foi possível a determinação dos alongamentos e consequentemente das deformações das geogrelhas ocorridas entre os pontos de fixação, com base na aplicação das sobrecargas sobre os protótipos. A Figura 5 apresenta as deformações ajustadas das geogrelhas de altura 60, 120 e 180 cm, nos Muros 01 e 02.

O Muro 01, com 6 geogrelhas de 20 kN/m, apresenta uma tendência de deformações máximas sobre faixa que atravessa toda a estrutura, saindo do fulcro da estrutura, e caminhando para seu topo na região traseira, muito similar a uma superfície de ruptura de Rankine.

O Muro 02, com 3 geogrelhas de 40 kN/m, apresenta tendência de deformações máximas mais próximo à sua face, indicando um maior nível de tensão nessa região da estrutura, além de apresentar uma maior mobilização das geogrelhas inferiores já nos níveis iniciais de aplicação de sobrecarga, indicando a ausência do efeito de espraiamento de tensões presente em estruturas com um maior número de reforços.

Aplicando os valores das deformações medidas nas geogrelhas às taxas de aumento de resistência determinadas, é possível então obter as tensões mobilizadas nos reforços, que no Muro 01, com 6 geogrelhas de 20 kN/m, foram em média de 0,45 a 0,88 kN/m, com os maiores valores de tensão ocorrendo na geogrelha mais elevada, enquanto que no Muro 02, com 3 geogrelhas de 40 kN/m, foram de 0,88 a 2,48 kN/m, com as maiores tensões ocorrendo respectivamente na geogrelha central e na menos elevada da estrutura.

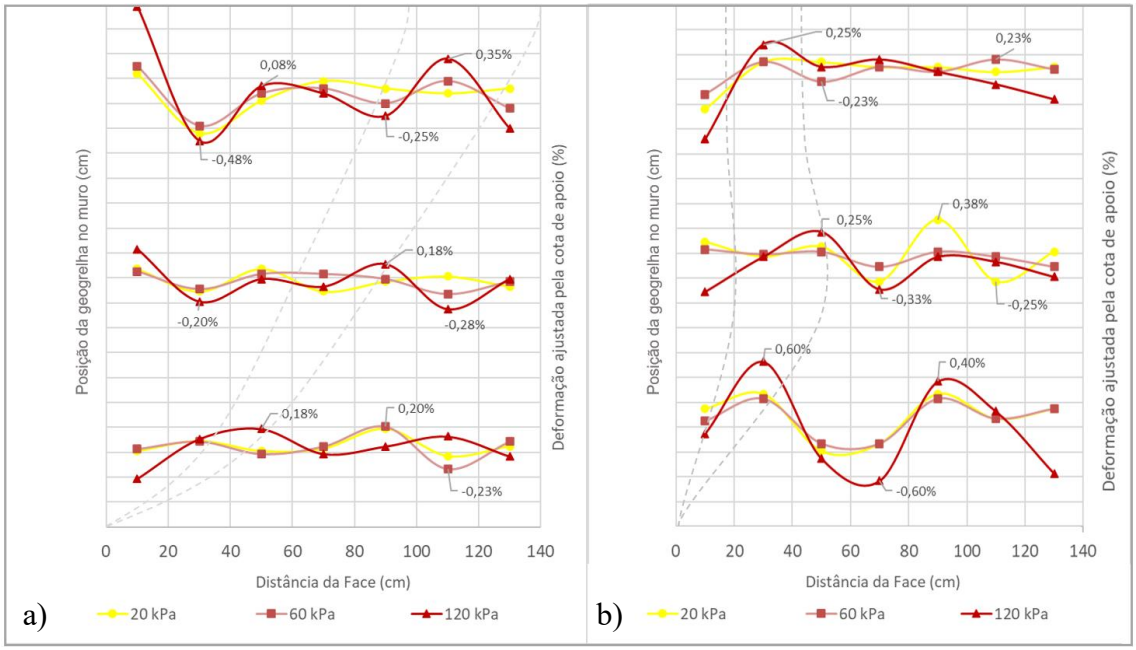


Figura 5. Deformações das geogrelhas: a) Muro 01; b) Muro 02.

4 DISCUSSÃO

Após aplicação de sobrecarga de 120 kPa, na região central, onde os muros sofreram deslocamentos em direção ao aterro, o Muro 01, com 6 reforços de 20 kN/m apresentou deslocamentos de face 55% menores que o Muro 02, com 3 reforços de 40 kN/m, demonstrando a maior eficiência do sistema com maior número de geogrelhas.

No topo das estruturas, onde os muros sofreram deslocamentos para fora da zona reforçada, o Muro 01, com 6 reforços de 20 kN/m, apresentou deslocamentos de face 33% menores que o Muro 02, com 3 reforços de 40 kN/m, mais uma vez demonstrando a maior eficiência do sistema com maior número de geogrelhas.

Após aplicação de sobrecarga de 120 kPa, a geogrelha posicionada a 120 cm de altura, apresentou em média, ao longo da extensão do reforço, deslocamentos 32 vezes menores no Muro 01, com 6 reforços de 20 kN/m em comparação ao Muro 02, com 3 reforços de 40 kN/m, demonstrando que geogrelhas mais espaçadas sofreram maiores solicitações, e consequentemente maiores alongamentos.

Após a aplicação de 120 kPa de carga, no protótipo 1, a linha de geogrelhas instalada no centro do bloco 8, com 150 cm de altura, apresentou em sua grande maioria deslocamentos para dentro do aterro, sendo esta mesma altura o ponto de inversão dos deslocamentos da face. A partir deste comportamento, pode-se concluir que a geogrelha foi devidamente tensionada, apresentando alongamento, mas mantendo sua horizontalidade, fazendo com que os pesos componentes dos extensômetros tipo tell tales se movessem para baixo.

Em ambos os Muros, após a aplicação da sobrecarga de 120 kPa, na cota de 120 cm, as faces em blocos se encontravam deslocadas para dentro do corpo do aterro, porém, as geogrelhas posicionadas na mesma elevação indicavam deslocamentos na direção oposta, demonstrando que o reforço sofreu um assentamento, sendo deslocado verticalmente para baixo, pelo bulbo de tensões formado pela sobrecarga aplicada com uso de bolsa flexível, resultando no tensionamento dos fios dos extensômetros tipo tell tales, puxando os pesos metálicos para cima e demonstrando a maior capacidade de dissipação de tensões verticais na estrutura com maior número de reforços.

Em relação às deformações, e consequentes tensões mobilizadas pelas reforços, é válido afirmar que o Muro 01, com 6 geogrelhas de 20 kN/m, apresentou uma tendência de deformações máximas sobre uma faixa que atravessa toda o maciço, iniciando no fulcro da estrutura, e caminhando para seu topo na região traseira, similar a superfície de ruptura de Rankine, enquanto que o Muro 02, com 3 geogrelhas de 40 kN/m, apresentou tendência de deformações máximas na região de sua face, indicando um maior nível de tensão nessa área, considerada crítica para estruturas em solo reforçado.

5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que em condições normais de umidade, para uma mesma soma de resistências, a utilização de menores espaçamentos verticais entre reforços, é capaz de promover redução de deslocamentos de face, dissipar com maior eficiência tensões verticais provenientes de sobrecargas aplicadas às estruturas, e deslocar os pontos de maior tensão para longe da face dos muros, e consequentemente diminuir as solicitações impostas à conexão entre reforço e paramento frontal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colegas do Grupo de Estudos em Geossintéticos da UFSCar (GEGEOS) pelo apoio no desenvolvimento experimental da pesquisa, bem como à empresa Geo Soluções pelo fornecimento dos geossintéticos utilizados no estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, M., Nicks, J., Stabile, T., Wu, J., Schlatter, W., Hartmann, J. (2011), Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System Interim Implementation Guide, FHWA-HRT-11-026, Federal Highway. Administration, McLean, VA

Leshchinsky, D., Kaliakin, V., Bose, P., Collin, J. (1994), Failure mechanism in geogrid reinforced segmental walls: experimental implications. Soils and Foundations, 34(4), 33–41.

Leshchinsky, D., Vulova, C. (2001), Numerical investigation of the effects of geosynthetic spacing on failure mechanisms in MSE block walls. Geosynthetics International.

Mitchell, J.K., Villet, W.C.B. (1987), Reinforcement of earth slopes and embankments. National Cooperative Highway Research Program Report 290.

Morsy, A.M., Leshchinsky, D., Zornberg, J.G. (2017), Effect of reinforcement spacing on the behavior of geosynthetic reinforced soil.

Morsy, A.M., Zornberg, J.G., Han, J., Leshchinsky, D. (2019), A new generation of soil-geosynthetic interaction experimentation. Geotextiles and Geomembranes, 47(4), 459–476.

Portelinha, F.H.M. (2012), Avaliação experimental da influência do avanço do umedecimento no comportamento de muros de solos finos reforçados com geotêxteis não tecidos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

ROCHA, P.E.O., Estruturas em Solo Reforçado com face em tela metálica em obra de grande porte em Cajamar – SP. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XX, 2022, Campinas, 2022.

Vilar, O. M., BUENO B. S., Mecânica dos Solos: Vol. 2, 1ª edição. São Carlos / Viçosa, 1979.

Sayão, A., Azambuja, E., Ehrlich, M., Gomes, R.C. (2015), Manual Brasileiro de Geossintéticos: Muros e taludes reforçados. 2ª ed., Blucher.

Wu, J.T.H. (2019), Characteristics of Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Walls: an overview of field-scale experiments and analytical studies. Transportation Infrastructure Geotechnology, 6, 138–163.