

Proposta de Solução Alternativa para Problemas de Esmagamento de Juntas de Paramento em Muros de Solo Reforçado de Grande Altura

Cristiano Victor Rodrigues

Engenheiro Civil, Terra Armada Ltda., Rio de Janeiro, Brasil, cristiano.rodrigues@terre-armee.com

Rafael Ribeiro Plácido

Professor Associado, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano, Brasil, rafael.placido@maua.br

Eugenio Pabst Vieira da Cunha

Engenheiro Civil, MSc, Interact Engenharia Ltda., diretor, São Paulo, Brasil, eugenio@interact.eng.br

RESUMO:

Este trabalho apresenta uma proposta de solução para mitigação de fenômenos recorrentes em maciços de solo reforçado de grande altura, com reforços em fitas metálicas e paramento em placas pré-moldadas de concreto. Tais patologias, de difícil reparação, frequentemente observadas em obras com alturas de paramento superiores a 15m, incluem o fechamento das juntas horizontais com o esmagamento dos apoios de elastômero, e o consequente desenvolvimento de trincas e fissuras nas placas de concreto da região do terço inferior dos muros. Este trabalho apresenta algumas das proposições atualmente existentes para a mitigação desses fenômenos e propõe uma solução alternativa, que se baseia na implementação de uma cortina de brita compactada imediatamente no tardo do paramento. Para a validação da solução proposta foram realizadas modelagens numéricas, empregando o Método dos Elementos Finitos, a partir de dados de uma estrutura real com altura total de 32,25m. São apresentados também resultados de medições de abertura de juntas horizontais da estrutura, cuja construção foi finalizada em outubro de 2023, que comprovam a eficácia da solução proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Muros de Solo Reforçado, Contenção, Análise Numérica.

ABSTRACT:

This paper presents a proposal for a solution to mitigate recurring phenomena in high-height MSE walls with steel strip reinforcements and pre-cast panel facing. Such pathologies, which are difficult to repair, are frequently observed in structures with facing height greater than 15m and include the closure of horizontal joints, with the crushing of elastomeric pads, and the consequent development of cracks and spalling in the concrete panels of the lower third region of the walls. This work presents some of the current solutions to mitigate such phenomena and proposes an alternative solution, which is based on the implementation of a compacted gravel curtain, immediately on the back of the wall panels. To validate the proposed solution, a series of numerical modeling were carried out using Finite Element Method, from a real structure data with a total height of 32.25m. Results of measurements of the horizontal joint gaps of the structure, whose construction was completed in October 2023, are also presented as evidence of the effectiveness of the proposed solution.

KEYWORDS: Reinforced Soil Walls, Retaining Walls, Numerical Analysis.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de solo reforçado, desenvolvidas por Vidal (1963), vêm sendo largamente empregadas em diversos setores. Desde a década de 1970, o segmento de infraestrutura rodoviária tem sido responsável pela maior parte do emprego dessas soluções. As aplicações rodoviárias típicas são contenções a meia encosta ou rampas de acesso a viadutos, com paramentos verticais segmentados em placas de concreto armado e uso de tiras metálicas ou sintéticas como elementos de reforço do maciço. Tais estruturas normalmente recebem sobrecarga de tráfego rodoviário e raramente ultrapassam 12 metros de altura.

1.1 O fenômeno observado e as patologias decorrentes

A partir dos anos 1990, muros de solo reforçado com paramento verticalizado passaram a ser considerados por empresas de mineração como solução preferencial para muros de britagem de grande altura (maiores do que 15m). Também dessa época são diversas estruturas de grande altura, como é o caso da contenção do Aeroporto de Seattle nos Estados Unidos, que atingiu desnível máximo de 46m, conforme apresentado por Stuedlein et al. (2010). Com tensões internas bastante mais elevadas, essas estruturas sujeitam-se, de forma mais intensa, a deformações por recalques internos do aterro armado, submetido ao peso próprio. Tais recalques, por reduzirem o desnível projetado entre camadas de reforço, despertam esforços adicionais de arrasto vertical nos elementos de conexão, que são transmitidos ao paramento. Soong & Koerner (1997) já apontavam tal efeito em muros de solo reforçado com geossintéticos (Figura 1).

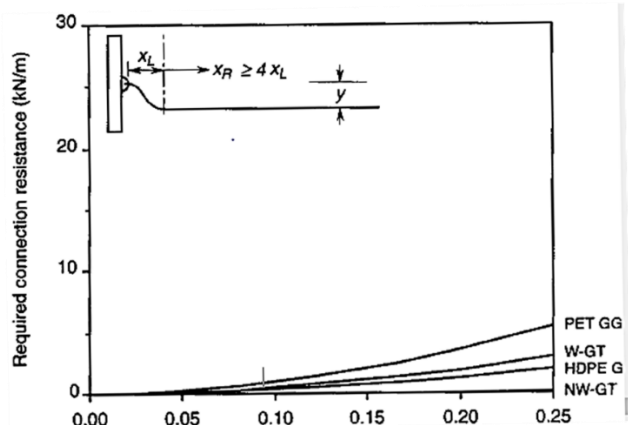


Figura 1. Resistência solicitante do elemento de conexão devida ao recalque uniforme do conjunto aterro/reforço, segundo Soong e Koerner (1997).

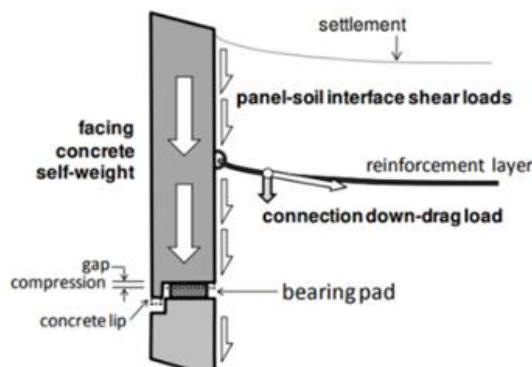


Figura 2 Contribuição para esforços verticais adicionais no paramento devido a recalques internos do conjunto aterro/reforços, segundo Damians et al. (2013).

Também conforme Damians et al. (2013), a ordem de grandeza de tais esforços adicionais, transmitidos pelos reforços/conexões ao paramento, seria bastante significativa em comparação ao peso próprio da coluna de painéis.

Em revisão do próprio trabalho, Damians et al. (2015) mencionam que as placas de concreto que formam o paramento do maciço de solo reforçado com fitas de aço devem suportar cargas superiores ao peso próprio desses painéis. Os autores concluem ainda que a carga vertical adicional suportada pela coluna do paramento resulta na compressão das juntas horizontais (de elastômero) entre os painéis adjacentes. Portanto, cargas verticais excessivas e/ou palmilhas de apoio excessivamente compressíveis podem levar ao contato painel com painel, o que pode causar rachaduras ou lascas nos painéis de concreto.

Em diversas observações, ao longo dos anos 1990, em casos executados de muros com alturas superiores a 18m, com reforços em fitas metálicas e paramentos em painéis de concreto, foram constatadas patologias, decorrentes de tais fenômenos, como, por exemplo: fechamento de juntas horizontais, colapso das palmilhas de elastômero e fissuras e lascas no contato entre placas adjacentes. Constatou-se também que a intensidade dos efeitos é muito maior no terço inferior dos muros, onde os recalques acumulados do aterro reforçado são de maior monta. Mesmo considerando o emprego de solos selecionados no volume armado, de características francamente granulares, conforme especificado no Anexo A da ABNT NBR 16920-1 (2021), recalques elásticos do corpo do aterro ocorrerão inevitavelmente, e apresentarão maior intensidade nas estruturas de maior altura. A Figura 3 mostra exemplos reais de casos em que ocorreram o fechamento das juntas e, como consequência, o trincamento dos painéis de concreto.



a)



b)

Figura 3 – Fechamentos de juntas horizontais, colapso das palmilhas de elastômero e trincas nos painéis.

1.2 Algumas soluções atualmente empregadas para mitigação das patologias

Considerando que a origem do problema estaria na diferença de rigidez entre a coluna do paramento (formado por painéis planares de concreto separados por placas de apoio de elastômero) e o maciço de aterro reforçado compactado, sendo este último relativamente mais compressível, torna-se claro que a solução não deveria passar por aumentar a rigidez das placas de elastômero.

As soluções buscadas orientaram-se para um aumento do grau de liberdade para movimentos verticais da coluna do paramento, de forma a compatibilizá-lo com as deformações por recalque do aterro armado. As soluções mais comumente empregadas são apresentadas nos itens a seguir.

1.2.1 Aumento da espessura de palmilhas de elastômero

Esta proposta, que passou a ser adotada em 2001 para muros com alturas superiores a 15m, considera a utilização, na parte inferior dos muros, de placas de elastômero mais espessas, com até 35mm, em lugar das placas usuais de 20mm de espessura. Todavia, em ambos os casos, o elastômero utilizado tem a mesma especificação e o mesmo módulo de elasticidade. A Figura 4 mostra exemplos de placas de apoio em elastômero (a) e esses apoios instalados entre dois painéis de concreto (b).



a)



b)

Figura 4 – Placas de apoio em elastômeros: a) Exemplos de placas de apoio em elastômero com espessuras de 35mm e 20mm; b) Placas de elastômero posicionadas entre os painéis de concreto, mantendo inicialmente o espaçamento de 35mm.

O objetivo dessa solução é incrementar significativamente a capacidade de deformação da coluna do paramento, tornando-a menos “rígida” em relação ao aterro compactado do tardoz. Tal solução mostrou-se eficaz para paramentos com alturas totais de até 20m.

1.2.2 A introdução dos “Painéis Compressíveis”.

Seguindo o mesmo conceito, Smith (2017) desenvolveu solução engenhosa criando painéis de concreto com juntas de poliestireno expandido (EPS) com 60mm de espessura, intencionalmente colapsíveis, instaladas

a intervalos verticais de 4,50m a 6,0m. Essa nova solução (Figura 5) considera que essas juntas adicionais deformáveis seriam utilizadas conjuntamente com as placas mais espessas de elastômero, de 35mm, em toda a metade inferior da altura do muro. Com isso, seria garantido um grau liberdade ainda maior para deformação vertical da coluna do paramento. A solução mostrou-se bastante eficaz nos casos de muros de solo reforçado com paramento vertical com alturas superiores a 30m.



Figura 5 – Solução em painéis compressíveis: a) Esquema de configuração da placa; b) Imagem de placa compressível sendo empregada em campo, Smith (2017).

2 UMA NOVA PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÃO: A “TRANSIÇÃO DE RIGIDEZ”

A solução de “Painéis Compressíveis”, embora bastante eficaz na mitigação das patologias, é mais complexa do ponto de vista executivo. Na prática, além da produção dos painéis especiais, torna-se necessário um trabalho adicional no campo para liberação do movimento vertical de cada uma das placas. Isso seria feito através do desaparafusamento de perfis metálicos nelas chumbados, a partir do momento em que o aterro atinge o topo dos painéis.

Uma solução menos laboriosa, aqui apresentada, busca um outro caminho. O de criar uma transição de rigidez entre a coluna do paramento e o maciço do aterro armado. Assim, intuitivamente, propõe-se uma ideia denominada “Transição de Rigidez”, que consiste na aplicação de uma cortina de brita compactada, de largura entre 1,5m a 2,0m, imediatamente atrás do paramento, implantada simultaneamente à execução do aterro.

Essa cortina, por ter uma rigidez superior à do aterro compactado, reduziria, localmente, o efeito do recalque interno e do arrasto vertical das conexões, responsável pelo fechamento das juntas. Essa nova solução não dispensaria o emprego de palmilhas de elastômero de maior espessura, até porque, a deformação relativa entre o paramento e a cortina de brita não será nulo, continuando a existir, embora de forma mais atenuada.

Visando testar a eficácia desta ideia intuitiva, este trabalho apresenta uma análise numérica de um caso real de estrutura construída, na qual essa solução foi adotada, com a seguinte configuração:

- Muro de solo reforçado paramento vertical, com altura total de 32,25m;
- Elementos de reforço em fitas metálicas com comprimentos variáveis de 18m a 23m, com espaçamento vertical de 0,75m e quantidades variáveis em função da altura.
- Paramento em painéis de concreto com dimensões nominais de 1,5m x 1,5m x 0,18m;
- Placas de apoio em elastômero, com espessuras de 20mm e 35mm, aplicadas entre os painéis, sendo que as últimas usadas na metade inferior da altura do muro;
- Os parâmetros geotécnicos dos materiais de aterro armado e tardoz estão definidos na Tabela 1, item 3;
- Cortina de brita graduada nº 2 (19mm a 25mm), compactada, em todo o tardoz do paramento, com espessura de 2,0m, cujos parâmetros estão definidos na Tabela 1 do item 3 a seguir;
- O solo de fundação nos níveis de implantação da estrutura de solo reforçado mostrou-se bastante competente (alteração de rocha, impenetrável à percussão);
- A seção típica empregada para esse trabalho é mostrada na Figura 6.

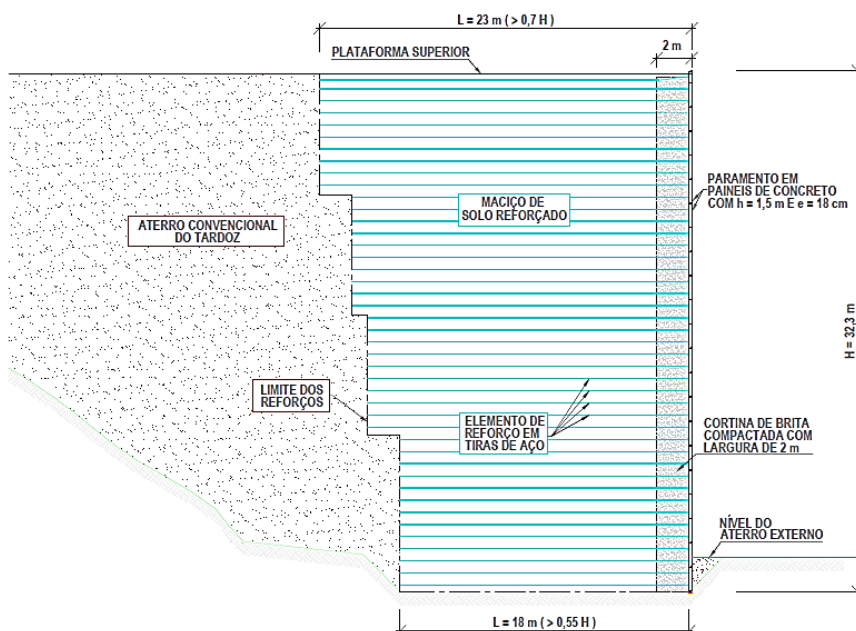


Figura 6 – Seção transversal típica da estrutura considerada, com a aplicação da cortina de brita compactada no tardo do paramento.

Nas modelagens numéricas foram consideradas duas situações para efeito de comparação e análise de eficácia:

- Caso 1: aterro volume armado com material granular, conforme NBR 16920-1, com a aplicação de dois tipos apoios elastômero, sendo: 35mm de espessura na metade inferior da altura e 20mm na metade superior, e **sem a aplicação da cortina de brita compactada**;
- Caso 2: aterro volume armado com material granular, conforme NBR 16920-1, com a aplicação de dois tipos apoios elastômero, sendo: 35mm de espessura na metade inferior da altura e 20mm na metade superior, e **com a aplicação da cortina de brita compactada**;

3 METODOLOGIA

Para analisar os efeitos da solução proposta na redução do esmagamento das juntas de elastômero em estruturas de contenção de grandes alturas, foi utilizada como ferramenta o software geotécnico Plaxis 2D, que se baseia no Métodos dos Elementos Finitos (MEF).

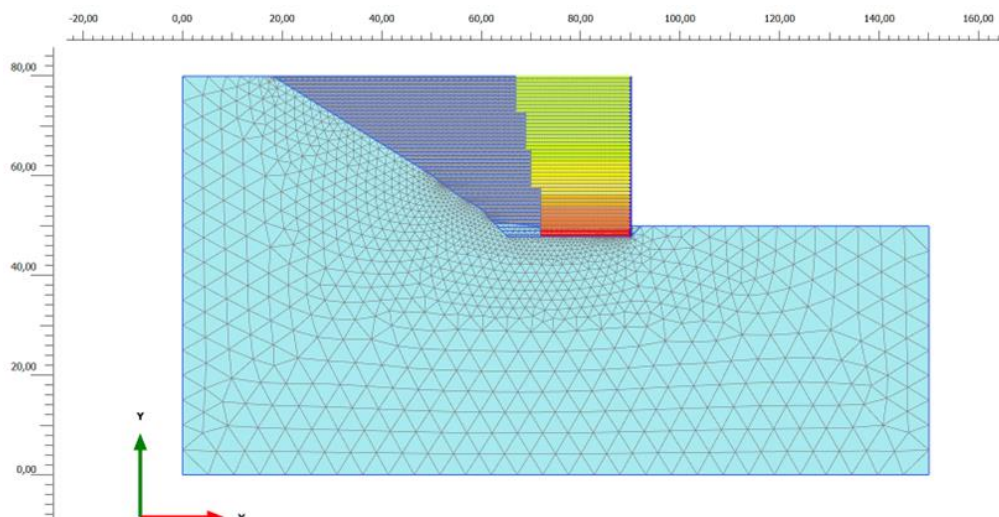


Figura 7 – Malha de Elementos Finitos gerada no software Plaxis 2D.

Destaca-se que foi utilizada uma malha triangular de 15 nós, com nível de refinamento “muito fino”, constituída por 8.093 elementos e 65.535 nós. A malha de elementos finitos gerada pelo programa é mostrada na Figura 7. Os solos foram modelados considerando modelo constitutivo elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

A Figura 8 apresenta um detalhe do emprego de placas de elastômero entre os painéis de concreto no modelo bidimensional gerado. Destaca-se que foram utilizados elastômetros com espessuras de 20mm e 35mm, aplicadas entre os painéis, sendo que os elementos de maior espessura foram usados na metade inferior da altura do muro.

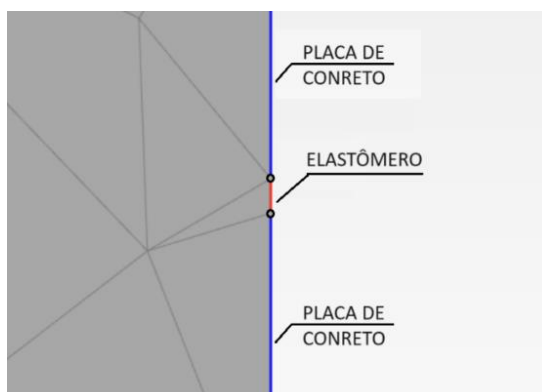


Figura 8 – Detalhe da junta entre os painéis de concreto com a utilização de placas de elastômero.

Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises são apresentados na Tabela 1. Os parâmetros empregados para os elementos estruturais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros geotécnicos dos solos utilizados no modelo.

Material	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	c (kPa)	ϕ (°)
Aterro Reforçado	21,0	20.850	0,30	0,0	38,9
Aterro Convencional	20,0	27.000	0,30	2,0	32,0
Solo de Fundação	18,0	120.000	0,30	60,0	40,0
Cortina de Brita	19,0	80.000	0,20	0,0	45,0

Tabela 2 – Parâmetros estruturais utilizados no modelo.

Material	Tipo	Comportamento	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	ν
Painéis de concreto	Plate	Elástico	6×10^6	11×10^6	0,15
Placas de elastômero	Plate	Elástico	1100	2,1	0,4
Fitas Metálicas	Geogrid	Elástico	$1,43 \times 10^5$ a $4,0 \times 10^5$	---	0,2

Os parâmetros do solo do aterro reforçado foram obtidos através de ensaios triaxiais realizados em laboratório, enquanto os parâmetros do aterro convencional e do solo de fundação, foram os mesmos empregados pelo projetista da obra. Os parâmetros do material denominado cortina de brita foram retirados de Killeen e McCabe (2014) e Hosseinpour et al. (2015). Já os parâmetros dos elastômeros, das placas de concreto e das fitas metálicas foram os mesmos empregados por Damians et al. (2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a verificação do efeito da presença da cortina de brita no comportamento da estrutura, foram analisados os deslocamentos horizontais, os deslocamentos verticais (recalques), a abertura das juntas ao longo da contenção e as cargas axiais nas placas inferiores. A Figura 9 mostra que os deslocamentos totais sofreram poucas alterações com uso da cortina de brita, apresentando uma redução de deslocamentos inferior a 10%.

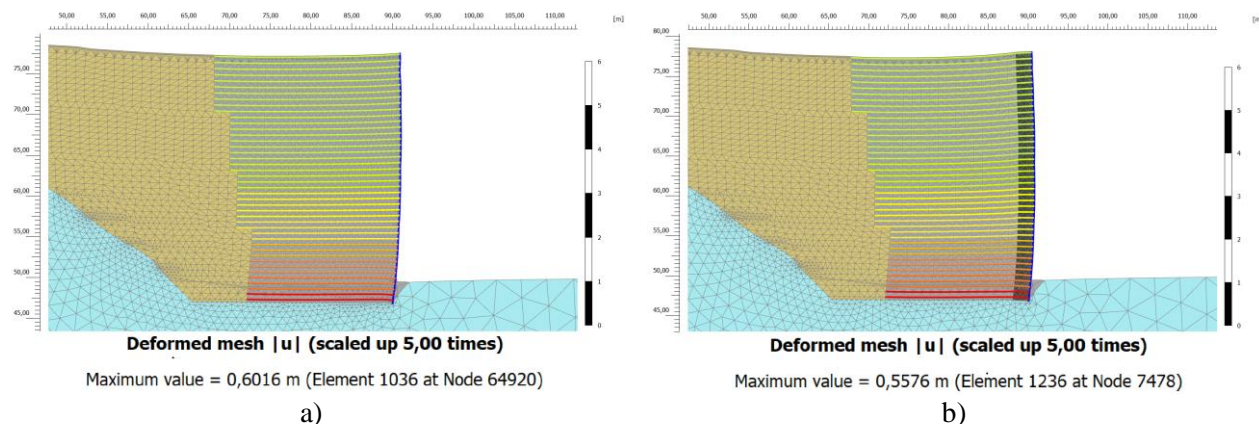


Figura 9 – Malha deformada em 5x para os casos: a) Sem cortina de brita; b) Com cortina de brita.

Analisando separadamente os deslocamentos horizontais e verticais, observa-se que o uso da cortina de brita promoveu uma redução de aproximadamente 13,5% para os deslocamentos medidos horizontalmente (Figura 10) e da ordem de 5% para os recalques (Figura 11).

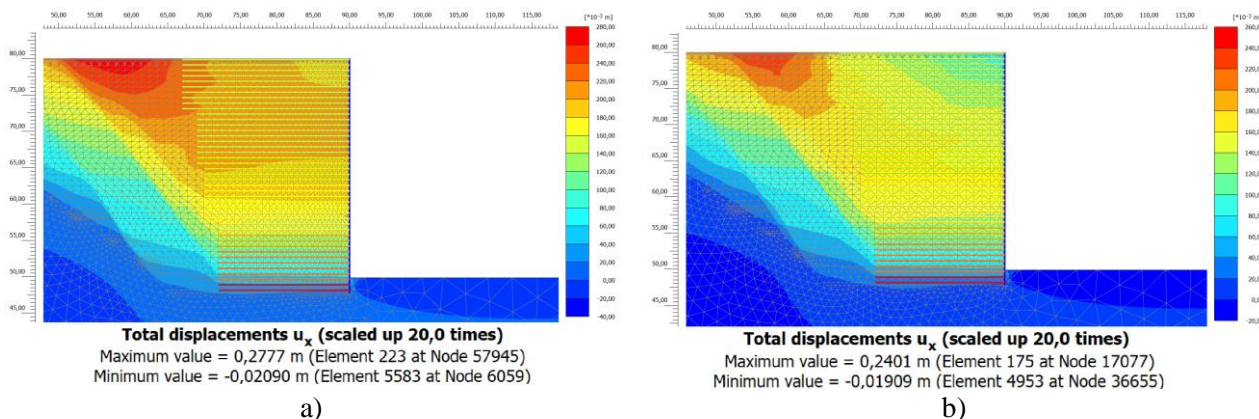


Figura 10 – Deslocamentos horizontais totais para os casos: a) Sem cortina de brita; b) Com cortina de brita.

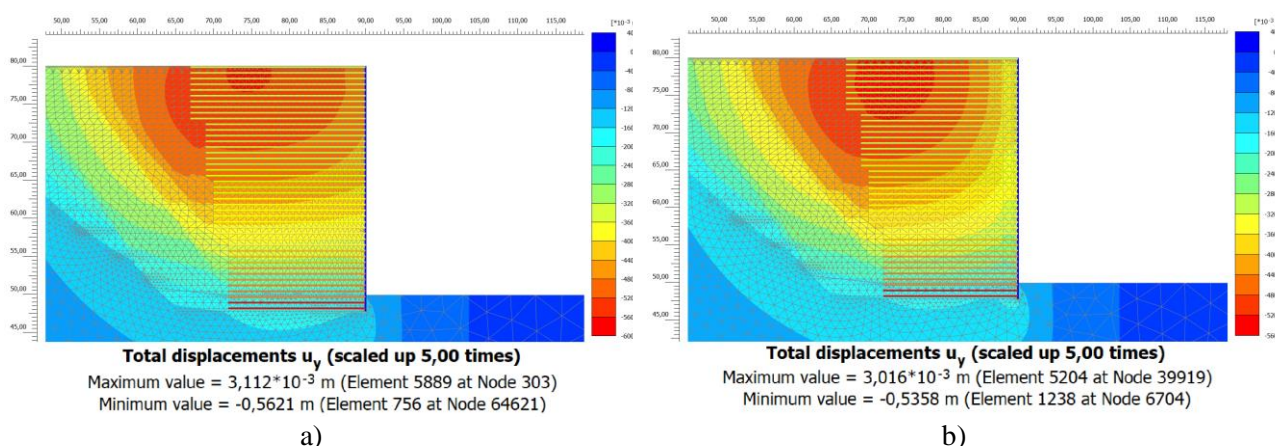


Figura 11 – Deslocamentos verticais totais para os casos: a) Sem cortina de brita; b) Com cortina de brita.

Em relação às deformações observadas em cada uma das placas de elastômero, os efeitos da presença da cortina de brita foram mais acentuados. Conforme mostrado na Tabela 3, as deformações máximas dos elastômeros, situados na base da estrutura de contenção, foram de quase 80% sem a utilização da cortina de brita. As placas de elastômero nessa posição, que inicialmente apresentavam uma espessura de 35mm, ficaram com uma espessura final de 8mm após todo o carregamento. Por outro lado, com a utilização da cortina de brita, as deformações finais das placas na base do muro apresentaram redução significativa. A maior deformação

observada foi de 54,3% na placa 2, que antes do carregamento possuía espessura de 35mm e após o carregamento de 16mm. A Figura 12 mostra a variação das deformações de outras placas ao longo da altura da estrutura.

Tabela 3 – Deformações das placas de elastômero ao longo da altura da estrutura de solo reforçado.

Placa de elastômero	h (m)	e _{inicial} (mm)	e _{final} (mm)		Deformação	
			Sem Brita	Com Brita	Sem Brita	Com Brita
1	0	35	27	30	22,9%	14,3%
2	1,535	35	9	16	74,3%	54,3%
3	3,07	35	8	18	77,1%	48,6%
4	4,605	35	10	19	71,4%	45,7%
5	6,14	35	12	21	65,7%	40,0%
6	7,675	35	14	22	60,0%	37,1%
7	9,21	35	16	23	54,3%	34,3%
8	10,745	35	14	22	60,0%	37,1%
9	12,28	35	18	25	48,6%	28,6%
10	13,815	35	23	27	34,3%	22,9%
11	15,35	35	23	28	34,3%	20,0%
12	16,885	35	24	29	31,4%	17,1%
13	18,42	35	18	25	48,6%	28,6%
14	19,955	20	13	15	35,0%	25,0%
15	21,475	20	15	16	25,0%	20,0%
16	22,995	20	16	17	20,0%	15,0%
17	24,515	20	17	18	15,0%	10,0%
18	26,035	20	14	16	30,0%	20,0%
19	27,555	20	18	19	10,0%	5,0%
20	29,075	20	19	19	5,0%	5,0%
21	30,595	20	18	18	10,0%	10,0%
22	32,115	20	20	20	0,0%	0,0%

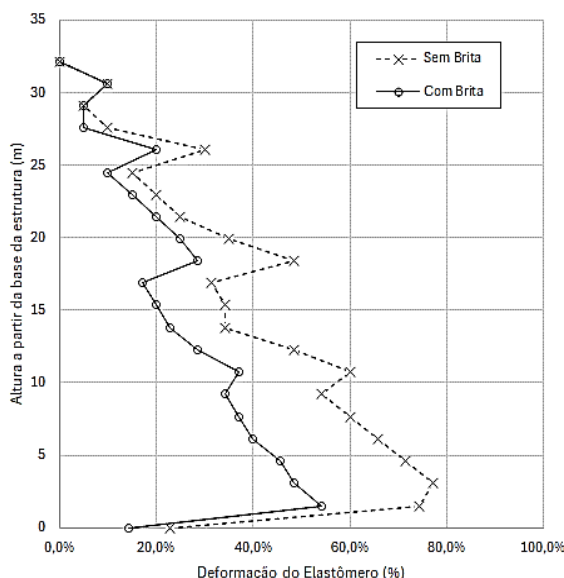


Figura 12 – Deformações das placas de elastômero ao longo da altura da estrutura para as condições testadas.

Para a avaliação dos efeitos da cortina de brita nos esforços axiais nos painéis de concreto, foi utilizada como referência o segundo painel, de baixo para cima, da estrutura de contenção. Os resultados dos esforços axiais para o painel de referência são mostrados na Figura 13. Observa-se que sem a presença da cortina de brita, o esforço máximo de compressão é de 1162 kN/m. Com a utilização da cortina de brita, o esforço axial máximo

é de 986,3 kN/m. A diferença entre os dois esforços pode ser atribuída ao efeito de arrasto das fitas metálicas que tendem a se deslocar verticalmente mais no interior do maciço do que nas proximidades da face de concreto, conforme relatado por Damians et al. (2013).

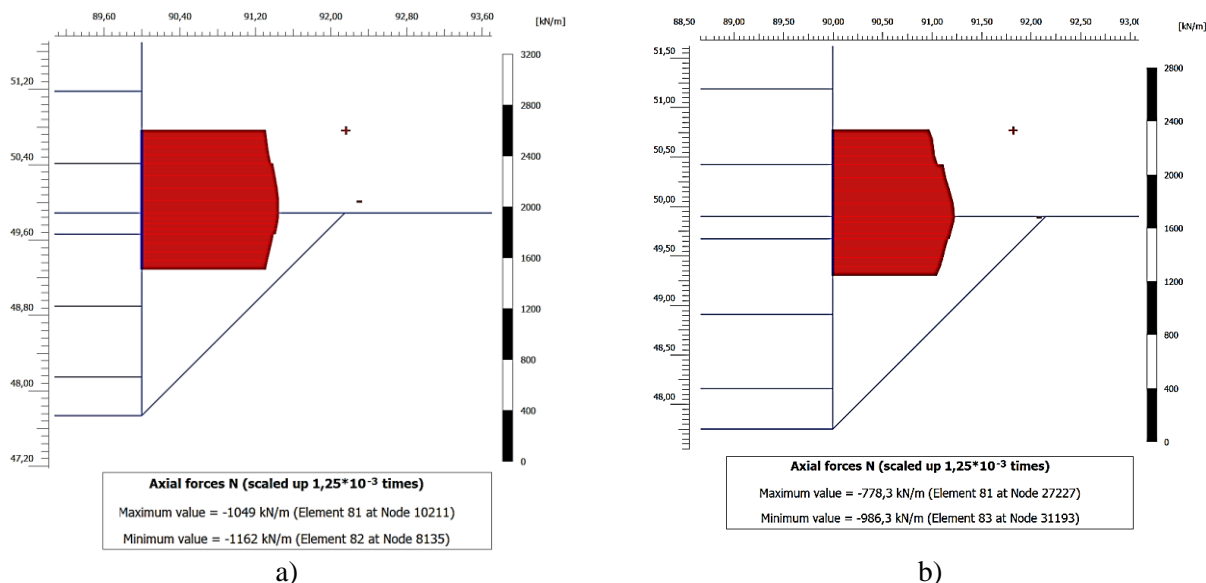


Figura 13 – Esforços axiais no segundo painel de concreto acima da base da contenção, para os casos:
a) Sem cortina de brita; b) Com cortina de brita.

5 COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA EXECUTADA

A estrutura real projetada, com 32,25m de altura, foi construída em um prazo de sete meses, entre março e outubro de 2023 (Figuras 14 e 15). O aterro do volume armado foi executado com solo francamente arenoso e a cortina de brita foi projetada e construída no tardo do paramento, com 2,0m de largura em toda a altura do muro. Os painéis de concreto, com 18 cm de espessura e 1,5m de altura, eram separados por placas de elastômero com espessuras de 35mm (até a cota 19m, a partir da base) e 20mm (da cota 19m até o topo). Embora o muro não tenha tido as deformações verticais e horizontais monitoradas, houve medições de abertura das juntas dos painéis mais inferiores, após o carregamento final do aterro (Figuras 16 e 17). As aberturas finais medidas atingiram, com pequenas variações, 18mm, não tendo sido observada, em nenhum ponto, a ocorrência de toque entre os painéis de concreto, nem tampouco as patologias decorrentes.



Figura 14 – A cortina de brita compactada no tardo do paramento.



Figura 15 – Vista externa da estrutura já executada em sua seção de maior altura.



Figura 16 – Vista externa das juntas, após a conclusão total do aterro, exibindo as aberturas mínimas (>15mm) preservadas.



Figura 17 – Detalhe da junta do segundo painel mais inferior, com abertura medida de 18mm, após a conclusão total do aterro.

6 CONCLUSÕES

As análises numéricas evidenciaram, em primeiro lugar, o efeito previsto do arrasto vertical das placas do paramento, devido às deformações verticais das camadas de aterro dentro do volume armado, e o consequente fechamento das juntas horizontais, sendo esse último efeito bastante mais intenso na seção sem a aplicação da cortina de brita. Os resultados dessas análises apontam a eficácia da solução da cortina de brita em preservar uma abertura mínima de juntas, evitando o contato entre painéis de concreto. Para a seção com a aplicação da cortina de brita, aberturas finais de juntas na região mais solicitada da ordem de 16mm, resultado muito semelhante aos 18mm medidos na obra. As análises também evidenciaram tensões máximas de compressão nos painéis de concreto bem menores na situação em que a cortina de brita foi aplicada, o que seria um efeito adicional positivo. Outro resultado também observado nas análises foi a menor grandeza de deslocamentos horizontais do paramento, na seção com a cortina de brita, sendo que no ponto de maior intensidade atingiu-se 14 mm, em lugar dos 22 mm na seção convencional. O desempenho da estrutura executada corroborou, de forma consistente, os resultados das análises. As grandezas das deformações das placas de elastômero, avaliadas indiretamente no campo pelas medições de fechamento das juntas, indicaram eficácia no objetivo de preservar toques indesejados entre os painéis de concreto, e as patologias decorrentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-1. *Muros e taludes em solos reforçados – Parte 1: Solos reforçados em aterros*. Rio de Janeiro.
- Damians, I. P., Bathurst, R. J., Josa, A., Lloret, A., Albuquerque, P. J. R. (2013) *Vertical-Facing Loads in Steel-Reinforced Soil Walls*. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.1419
- Damians, I. P., Bathurst, R. J., Josa, A., & Lloret, A. (2015). *Numerical Analysis of an Instrumented Steel Reinforced Soil Wall*. *In International Journal of Geomechanics*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000394](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000394).
- Hosseinpour, I.; Almeida, M.S.S.; Riccio, M. (2015) *Full-scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns*. *Geosynthetics International*. 2015, 22, 428–438.
- Killeen, M.; McCabe, B.A. (2014) *Settlement performance of pad footings on soft clay supported by stone columns: A numerical study*. *Soils and Foundations*. 2014, 54, 760–776.
- Smith, A. (2017). *Internal settlement of the backfill in MSE structures*. In: *Civil Engineering – March 2019*.
- Stuedlein A. W., Bailey M., Lindquist D., Sankey J., Neely W. J. (2010). *Design and Performance of a 46-m-High MSE Wall*. *Journal of Geotech. and Geoenv. Engineering – ASCE – June 2010 – pp. 786-796*.
- Soong, T. Y. and Koerner, R. M. (1997). *On the Required Connection Strength of Geosynthetically Reinforced Walls*. Geosynthetic Research Institute, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, USA.
- Vidal, H. (1969). *The Principle of Reinforced Earth*. *Transportation Research Record*, Vol. 282, pp. 1-16.