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/COBRAMSEG2026.4/24

Análise Numérica 2D do Comportamento de um Muro de Solo Reforçado sob Carregamento Externo Localizado

Vitor Borges Ferreira Leite
Mestre, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, vitor.leite@coc.ufrj.br

Seyedhamed Mirmoradi
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, hamed.mirmoradi@coc.ufrj.br

Mauricio Ehrlich
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, me@coc.ufrj.br

RESUMO: O comportamento tensão-deformação de Muros de Solo Reforçado (MSR) é governado por mecanismos complexos de interação solo-reforço-estrutura. Tradicionalmente, os procedimentos de análise dessas estruturas baseiam-se em métodos analíticos, os quais, em geral, conduzem a resultados conservadores ou não reproduzem adequadamente os fenômenos envolvidos. Com o avanço da capacidade computacional, as simulações numéricas passaram a desempenhar papel importante para a análise mais realista do desempenho dessas estruturas. Diversos estudos numéricos têm contribuído para a avaliação de MSR em condições de serviço. Entretanto, ainda é comum que fatores essenciais não sejam considerados de forma conjunta, como a Tensão Induzida pela Compactação (TIC), o comportamento tensão-deformação não linear do solo de aterro e a atuação de carregamentos localizados. Essa lacuna motiva o desenvolvimento de estudos que incorporem esses efeitos de maneira integrada. Assim, o objetivo principal deste artigo é realizar simulações numéricas bidimensionais, via Método dos Elementos Finitos (MEF), de um MSR com tiras metálicas, instrumentado e submetido a carregamentos localizados, considerando os fatores anteriormente mencionados. Os resultados das análises foram confrontados com dados de instrumentação de campo para fins de validação, permitindo avaliar a capacidade da modelagem numérica 2D em reproduzir o comportamento observado.

PALAVRAS-CHAVE: Carregamento Externo Localizado, Método dos Elementos Finitos, Simulações Numéricas, Muro de Solo Reforçado, Tensão Induzida pela Compactação.

ABSTRACT: The stress-strain behavior of Mechanically Stabilized Earth (MSE) walls is governed by complex soil-reinforcement-structure interaction mechanisms. Traditionally, their analysis has relied on analytical methods, which generally lead to conservative results or fail to adequately reproduce the involved phenomena. With the advancement of computational capabilities, numerical simulations have become fundamental tools for achieving a more realistic assessment of the performance of these structures. Several numerical studies have contributed to the evaluation of MSE walls under working stress conditions. However, it is still common that essential factors are not jointly incorporated into MSE analyses, such as compaction-induced stress (CIS), the nonlinear stress-strain behavior of the backfill soil, and localized surcharge loading. This gap motivates the development of studies that integrate these effects in a unified manner. Therefore, the main objective of this paper is to perform two-dimensional numerical simulations, using the Finite Element Method (FEM), of an instrumented MSE wall reinforced with metallic strips and subjected to localized surcharge loads, incorporating the aforementioned factors. The numerical results were subsequently compared with field instrumentation data for validation, allowing the assessment of the capability of the 2D numerical model to reproduce the observed behavior.

KEYWORDS: Localized Surcharge Loading, Finite Element Method, Numerical modelling, Reinforced Soil Wall, Compaction-induced Stresses.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento tensão-deformação de Muros de Solo Reforçado (MSR) envolve interações complexas entre solo, reforços e estrutura, exigindo métodos de análise capazes de representar de forma mais realista o desempenho dessas obras em serviço. Essa necessidade é ainda mais crítica em projetos ferroviários, nos quais as cargas móveis geram mecanismos sofisticados de transmissão de esforços e onde os modelos analíticos convencionais, baseados em hipóteses simplificadas de contato contínuo entre camadas, não representam adequadamente as descontinuidades e o caráter particulado dos materiais. Além disso, o aumento das velocidades operacionais e das cargas por eixo impõe critérios mais restritivos de deslocamento admissível, tornando indispensável o uso de abordagens mais refinadas. Nesse cenário, as simulações numéricas se expressam como uma ferramenta fundamental para a avaliação do comportamento estrutural, tanto em estudos acadêmicos quanto em aplicações de engenharia de projeto.

Diversos estudos numéricos têm avançado na compreensão do comportamento de MSR em condições de serviço (por exemplo, Bourgeois et al., 2011; Liu et al., 2021; Damians et al., 2014; Hung et al., 2021), incluindo aplicações em aterros ferroviários reforçados (por exemplo, Vadavadagi and Chawla, 2022; Xu et al., 2024). Contudo, apesar dos progressos obtidos, ainda é recorrente a ausência de uma abordagem integrada que considere, simultaneamente, efeitos fundamentais como a Tensão Induzida pela Compactação (TIC), o comportamento não linear do solo do aterro e a presença de carregamentos localizados, os quais, inclusive, não são contemplados por metodologias analíticas tradicionais. Nesse contexto, a modelagem numérica bidimensional tem sido amplamente empregada em estudos paramétricos e em análises de comportamento de MSR, constituindo uma ferramenta eficiente para investigar os mecanismos de resposta dessas estruturas quando os principais fatores de influência são devidamente considerados.

Este trabalho tem como objetivo investigar, por meio de modelagem numérica bidimensional, o comportamento de um MSR em escala real com tiras metálicas, sob infraestrutura ferroviária e submetido a sobrecargas localizadas. As análises foram realizadas utilizando o programa PLAXIS 2D. Em diferentes cenários de simulação, considerou-se separadamente a presença e a ausência da Tensão Induzida pela Compactação (TIC). Adicionalmente, foram aplicadas sobrecargas externas de 90 kN e 850 kN após o término do alteamento do muro. Por fim, os resultados numéricos foram confrontados com dados experimentais obtidos a partir do Modelo Físico instrumentado, a fim de proceder à validação do modelo numérico desenvolvido. Para avaliar exclusivamente o efeito da sobrecarga localizada no desempenho do MSR, foram computados apenas deslocamentos e tensões mobilizados durante a fase pós-construtiva.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu na construção de um Modelo Físico instrumentado, em escala real, situado no Centro de Experimentação Rodoviária (CER) de Rouen, na França. As informações sobre este item foram retiradas de Bourgeois et al. (2011, 2012), Soyez (2011) e Leite (2025).

A face da contenção apresentou 8 m de largura e 3,75 m de altura, sendo composta por painéis cruciformes pré-fabricados de concreto, com 14 cm de espessura e dimensões entre eixos de 1,5 m × 1,5 m. No topo dos painéis, foram posicionados elastômeros de EPDM com 2 cm de espessura para minimizar as forças de downdrag. Cada painel possuía quatro reforços de aço galvanizado HAR 45x5 (45 mm de largura × 5 mm de espessura × 3,5 m de comprimento), com espaçamento vertical constante de 0,75 m e espaçamento horizontal variável, igual a 0,9 m no mesmo painel e 0,6 m entre painéis adjacentes.

O aterro projetado apresentou 8 m de largura, 16,5 m de comprimento e 3,53 m de altura, estando apoiado sobre fundação indeformável. Sobre o aterro, foram executados o sublastro e o lastro, ambos com 30 cm de espessura, além de um dormente de concreto (2,4 m de comprimento × 0,30 m de largura × 0,27 m de altura), posicionado perpendicularmente à face da estrutura e centrado lateralmente. Segundo a norma NF P 11-300 (AFNOR, 1992), o solo do aterro foi classificado como cascalho argiloso. O sublastro foi constituído por brita graduada com $d_{máx}$ = 31,5 mm e atende às especificações para Linhas de Alta Velocidade (LGV) (SNCF, 1999). O lastro, composto por brita lavada com granulometria entre 31,5 mm e 50 mm, está em conformidade com a IN 0091 (SNCF, 1999).

O alteamento e a compactação do aterro foram realizados em dez camadas sucessivas. As nove primeiras apresentaram, de baixo para cima, 37,5 cm de espessura após a compactação, enquanto a última apresentou 15

cm. As TIC adotadas são: 8 kPa para a compactação leve, aplicada em uma faixa de 0,5 m junto à face, e 100 kPa para a compactação pesada, aplicada até 0,5 m antes do final do aterro.

Após a construção do muro, foram consideradas duas etapas de carregamento estático: inicialmente, uma carga de 90 kN foi aplicada diretamente sobre o dormente, a 1,8 m da face do muro; posteriormente, o dormente foi substituído por uma placa de aço com dimensões de 2,4 m × 0,9 m, sobre a qual foi aplicada uma carga de 850 kN, cujo eixo foi mantido na mesma posição do eixo do dormente.

Os deslocamentos horizontais e verticais foram medidos por meio de sensores do tipo LVDT. Para monitorar os esforços de tração, *strain gauges* foram posicionados em diferentes pontos ao longo do comprimento dos quatro primeiros níveis de reforços.

A Figura 1 apresenta a vista frontal do muro com o respectivo plano de instrumentação, enquanto a Figura 2 ilustra a seção transversal instrumentada, localizada a 4,45 metros da extremidade esquerda do muro (coincidente com os LVDT 17, 14, 9, 5 e 3 – Figura 1).

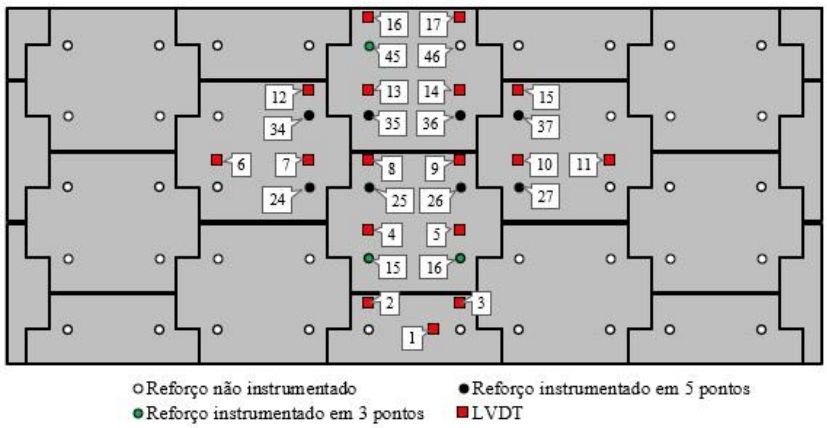


Figura 1. Plano de instrumentação: vista frontal (Leite, 2025).

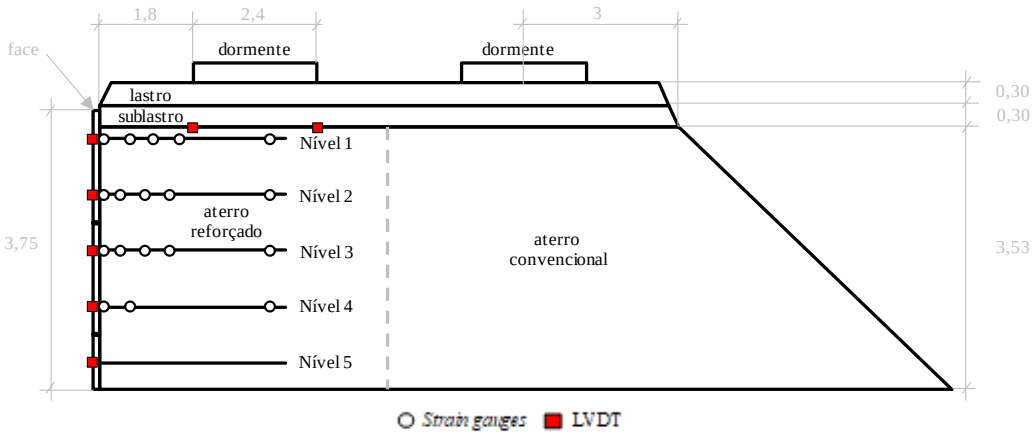


Figura 2. Instrumentação: seção transversal – dimensões em metros (Leite, 2025).

3 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica do MSR e as análises subsequentes foram conduzidas através do *software* PLAXIS 2D, versão 2024, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). A definição dos níveis de discretização fundamentou-se em um estudo paramétrico detalhado, no qual se avaliaram os efeitos da malha sobre os deslocamentos horizontais e verticais e sobre os esforços máximos mobilizados nos reforços. O refinamento da malha de elementos finitos foi do tipo muito fino. Na análise numérica empregaram-se elementos finitos triangulares de 15 nós (6.652 elementos e 53.998 nós). A Figura 3 apresenta a malha de Elementos Finitos criada no modelo 2D.

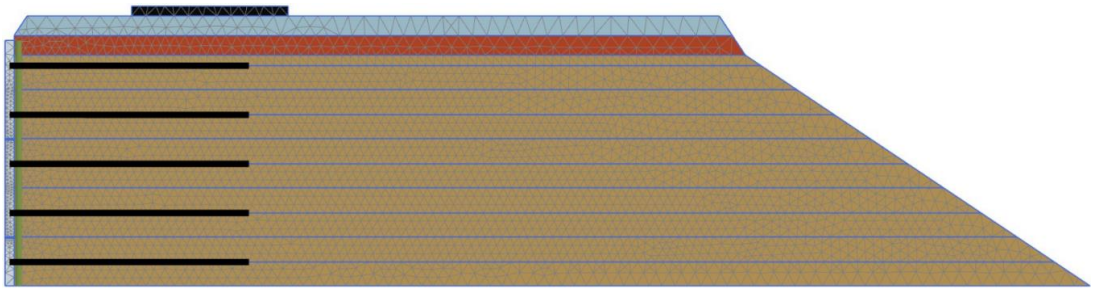


Figura 3. Malha de Elementos Finitos do modelo.

Cabe lembrar que a confiabilidade dos resultados numéricos depende da representatividade dos parâmetros geotécnicos adotados, os quais devem ser obtidos, sempre que possível, por meio de ensaios laboratoriais e de campo, como observado no caso descrito.

Nas modelagens 2D e 3D, os solos, o dormente e a placa de aço foram representados por elementos de volume, enquanto o solo de fundação foi considerado indeformável. O comportamento tensão-deformação do aterro foi simulado pelo modelo Hardening Soil (HS), selecionado com base em sua capacidade de reproduzir o desempenho de MSR, sendo calibrado a partir de ensaios triaxiais drenados conduzidos por Reiffsteck et al. (2007) em amostras moldadas com o próprio material do aterro (σ_3 = 50 kPa), com ajuste das curvas no Soil Test do PLAXIS. O peso específico do aterro foi adotado conforme Bourgeois et al. (2011).

O lastro e o sublastro foram modelados com o Modelo Elástico Linear Perfeitamente Plástico com Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb (MC), conforme demonstrado por Profillidis (2014), enquanto o dormente de concreto e a placa de aço foram descritos por comportamento Elástico Linear, com base em Bourgeois et al. (2011).

Os painéis da face foram modelados por elementos de volume com modelo EL. A rigidez axial das juntas horizontais foi ajustada para compatibilizar a disposição de múltiplos elastômeros por painel com a simplificação numérica adotada, considerando a condição de estado plano de deformações característica da modelagem bidimensional**.** Os parâmetros de entrada foram definidos por Damians et al. (2014).

Os reforços foram representados por elementos do tipo *geogrid* com modelo EL, adotando-se rigidez por metro de largura. Foi necessária a definição de uma rigidez equivalente para atender à hipótese de estado plano de deformações, calculada pela razão entre a rigidez axial (EA) e o espaçamento horizontal médio entre reforços. Considerando-se o arranjo típico de quatro reforços a cada 3 m na face, adotou-se s_h = 3/4 = 0,75 m. A conexão entre reforço e face foi simulada por um elemento do tipo *plate*, com 10 mm de espessura e 107 mm de comprimento, em aço galvanizado A36 (Société de Terre Armée, 2013).

As interfaces solo-face foram consideradas nas análises, adotando-se os mesmos parâmetros do aterro, exceto quanto à resistência: a coesão foi reduzida a valor desprezível, enquanto o ângulo de atrito foi mantido integral (Yu et al., 2016). Admitiu-se aderência perfeita na interface solo-reforço, hipótese compatível com condições de serviço (Dyer e Milligan, 1984).

A TIC foi modelada conforme a abordagem Tipo II, descrita por Mirmoradi e Ehrlich (2015). Cada camada de solo foi submetida a um carregamento uniformemente distribuído aplicado de cima para baixo em seu topo e de baixo para cima em sua base (Mirmoradi e Ehrlich, 2018).

A representação das sobrecargas foi realizada no modelo 2D por meio de duas abordagens: (I) as cargas foram ajustadas à largura total do modelo (8 m), correspondendo a duas cargas lineares de 5,625 kN/m para o caso de 90 kN e a 44,27 kN/m/m para o carregamento de 850 kN; (II) considerou-se uma largura de 1 m, configurando um limite superior, resultando em duas cargas de 45 kN/m para o carregamento de 90 kN (90 kN*) e em 354,2 kN/m/m para o carregamento de 850 kN (850 kN*), respectivamente.

Em relação às condições de contorno, a base foi restringida nas direções vertical e horizontal, enquanto os demais contornos permaneceram livres. Além disso, foram introduzidos travamentos na face da estrutura para simular o escoramento adotado durante a construção.

O MSR foi modelado em etapas, respeitando a metodologia construtiva comumente empregada nesse tipo de estrutura, como em Damians et al. (2014). Ao todo, foram simuladas 42 etapas construtivas, nas quais a metade leva em consideração a presença da compactação, e as demais desconsideram esse efeito.

Os parâmetros relativos ao MSR estudado encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros relativos ao MSR utilizados.

Grupo	Modelo	Parâmetros
Aterro	HS	γ = 20,8 kN/m³ ϕ = 50,4° c = 13,4 kPa ψ = 20,4° E_{50}^{ref} = 68 MPa E_{oed}^{ref} = 40 MPa E_{ur}^{ref} = 204 MPa m = 0,7 R_f = 0,5 ν_{ur} = 0,12 p_{ref} = 50 kPa
Sublastro	MC	γ = 23,3 kN/m³ ν = 0,3 E = 90 MPa ϕ = 36° c = 10 kPa ψ = 6°
Lastro	MC	γ = 17 kN/m³ ν = 0,35 E = 150 MPa ϕ = 45° c = 0,2 kPa ψ = 15°
Dormente	EL	γ = 25 kN/m³ ν = 0,2 E = 25x10³ MPa
Placa de aço	EL	γ = 78 kN/m³ ν = 0,3 E = 205x10³ MPa
Painel de Concreto	EL	γ = 23,3 kN/m³ ν = 0,3 E = 90 MPa e = 0,14 m
Elastômero	EL	γ = 2,5 kN/m³ ν = 0,45 E_{elast} = 15 MPa A_{elast} = 0,007 m² $N_{elast/junta}$ = 12 $L_{base,painel}$ = 8 m A_{junta} = 1,12 m² E_{junta} = 1,125 MPa
Reforços	EL	E = 2,1x10^8 kPa A = 2,25x10^{-4} m² s_h = 0,75 m $(EA)_{eq}$ = 6,3x10^4 kN/m
Conexão	EL	d = 0,01 m γ = 78,5 kN/m³ E = 2,1x10^8 kPa
Interface solo-face	MC	γ = 20,8 kN/m³ E = 68000 kPa ν = 0,3 $c_{solo-face}$ = 0,1 kPa $\phi_{solo-face}$ = 50,4°

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações foram confrontados com os dados do programa experimental com o objetivo de validar o modelo desenvolvido no PLAXIS. Consideraram-se apenas as respostas no período pós-construtivo. A validação baseou-se nos deslocamentos horizontais da face, nos deslocamentos verticais na interface aterro-sublastro e no incremento das cargas mobilizadas nos reforços de um mesmo nível.

A Figura 4 mostra o perfil de deslocamentos horizontais da face. Em relação aos deslocamentos horizontais da face, para o carregamento de 850 kN, observaram-se deslocamentos horizontais mais elevados que aqueles associados a 90 kN, como esperado, mantendo formato semelhante das curvas em todas as simulações, com máximos situados entre os dois níveis superiores de painéis (a base se encontra restringida). Além disso, a desconsideração da compactação resultou em maiores deslocamentos pós-construtivos.

Para 90 kN, as análises com consideração da compactação apresentaram boa concordância entre si e com as medições, indicando que, como a carga não supera a TIC, o comportamento permanece governado pelos efeitos construtivos e o modelo bidimensional é capaz de representar adequadamente o comportamento da estrutura para esse nível de carregamento.

Para o carregamento de 850 kN, observou-se maior sensibilidade dos resultados às hipóteses adotadas na representação das cargas no modelo 2D. As análises com carregamento distribuído em 1 m de largura produziram deslocamentos mais elevados quando comparadas àquelas em que a carga foi distribuída ao longo da largura total do modelo (8 m), em razão da maior concentração de tensões associada à menor área de aplicação da carga. Esse resultado evidencia a influência da forma de representação de carregamentos localizados em análises bidimensionais.

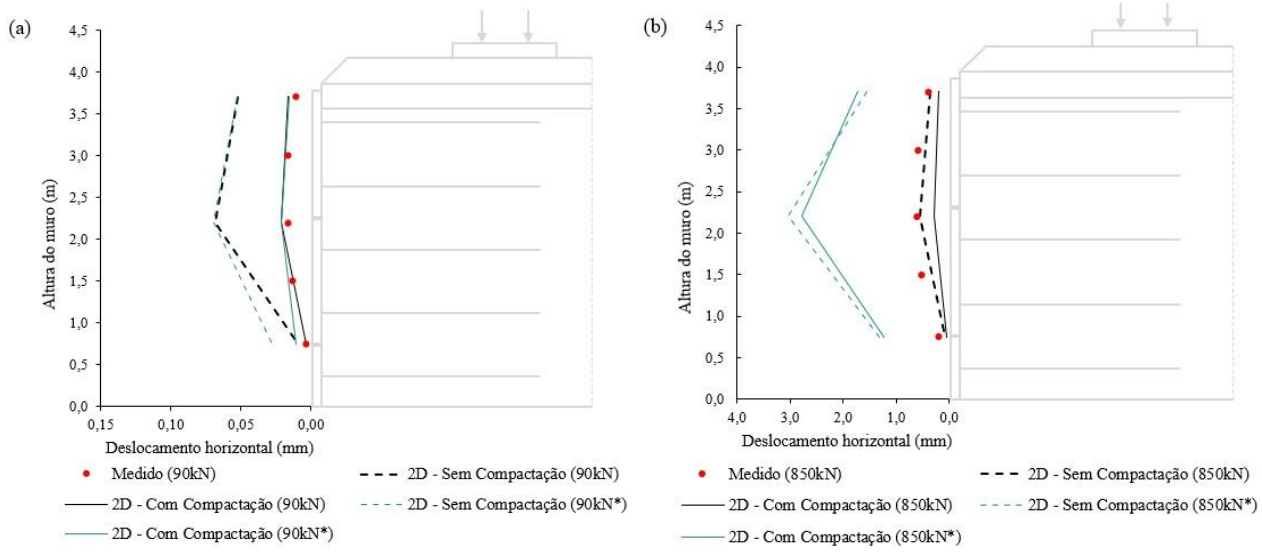


Figura 4. Deslocamentos horizontais da face: (a) 90 kN; (b) 850 kN.

A Figura 5 apresenta o perfil de deslocamentos verticais na interface aterro-sublastro. As curvas apresentaram padrão semelhante em todos os casos, com máximos sob o dormente. Modelos que não consideraram a TIC apresentaram maiores recalques pós-construtivos em comparação com aqueles em que a TIC foi considerada.

Para o carregamento de 90 kN, as análises com consideração da compactação foram semelhantes e apresentaram resultados próximos aos valores medidos.

Já para 850 kN, observou-se maior sensibilidade dos resultados às hipóteses adotadas na representação das cargas no modelo 2D. Nas análises com consideração da TIC, a representação do carregamento distribuído em 1 m de largura resultou em significativa superestimação dos valores medidos, enquanto a distribuição da carga ao longo da largura total do modelo (8 m) conduziu à subestimação dos resultados de monitoração.

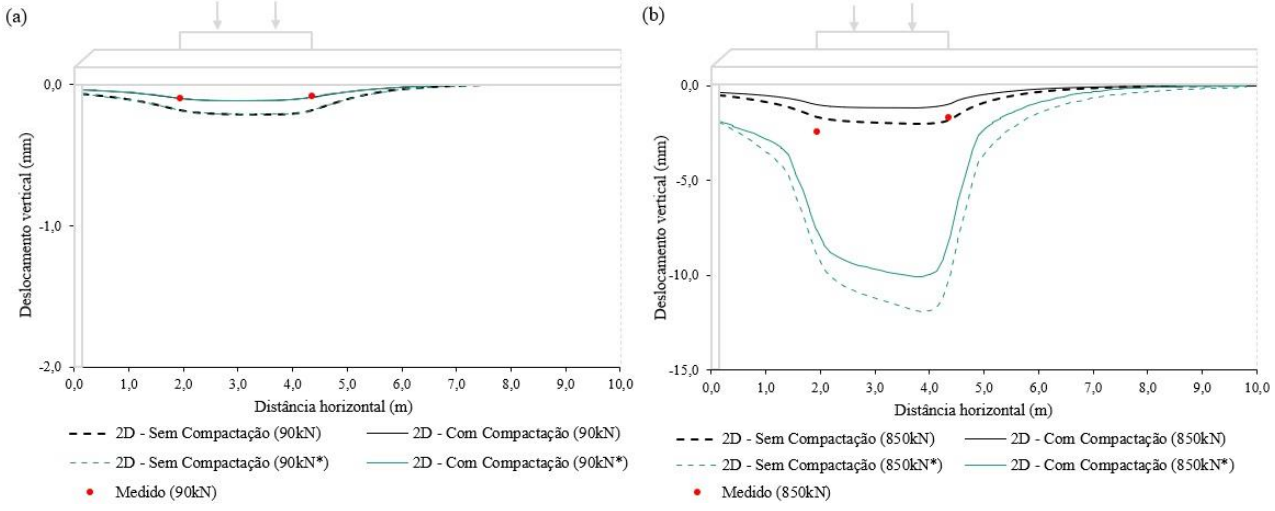


Figura 5. Deslocamentos verticais na interface aterro-sublastro: (a) 90 kN; (b) 850 kN.

A Figura 6 exibe a distribuição do incremento de tração nos reforços nos diferentes níveis, obtido a partir das leituras dos *strain gauges* indicados nas Figuras 1 e 2. Devido a falhas na aquisição dos dados de carga dos reforços do quarto nível durante a aplicação da carga de 850 kN, os resultados correspondentes a esse nível não são apresentados (Soyez, 2011).

Como esperado, o cenário de 850 kN apresentou maiores magnitudes que o de 90 kN. De modo geral, as análises com carregamento distribuído em 1 m de largura tenderam a superestimar os esforços de tração,

enquanto as análises em que a carga foi distribuída ao longo da largura total do modelo (8 m) apresentaram resultados mais próximos das medições experimentais.

Para o carregamento de 90 kN, as diferentes abordagens de modelagem do carregamento nas análises com consideração da compactação resultaram em diferenças desprezíveis nos resultados. Neste caso, observou-se ainda que, os incrementos permaneceram praticamente constantes ao longo da altura (≈0,3 kN), enquanto, para 850 kN, aumentaram com a profundidade, atingindo cerca de 3,7 kN no terceiro nível. Os níveis inferiores mostraram baixa mobilização devido à restrição de deslocamentos na base da face, sobretudo quando considerados os efeitos da compactação.

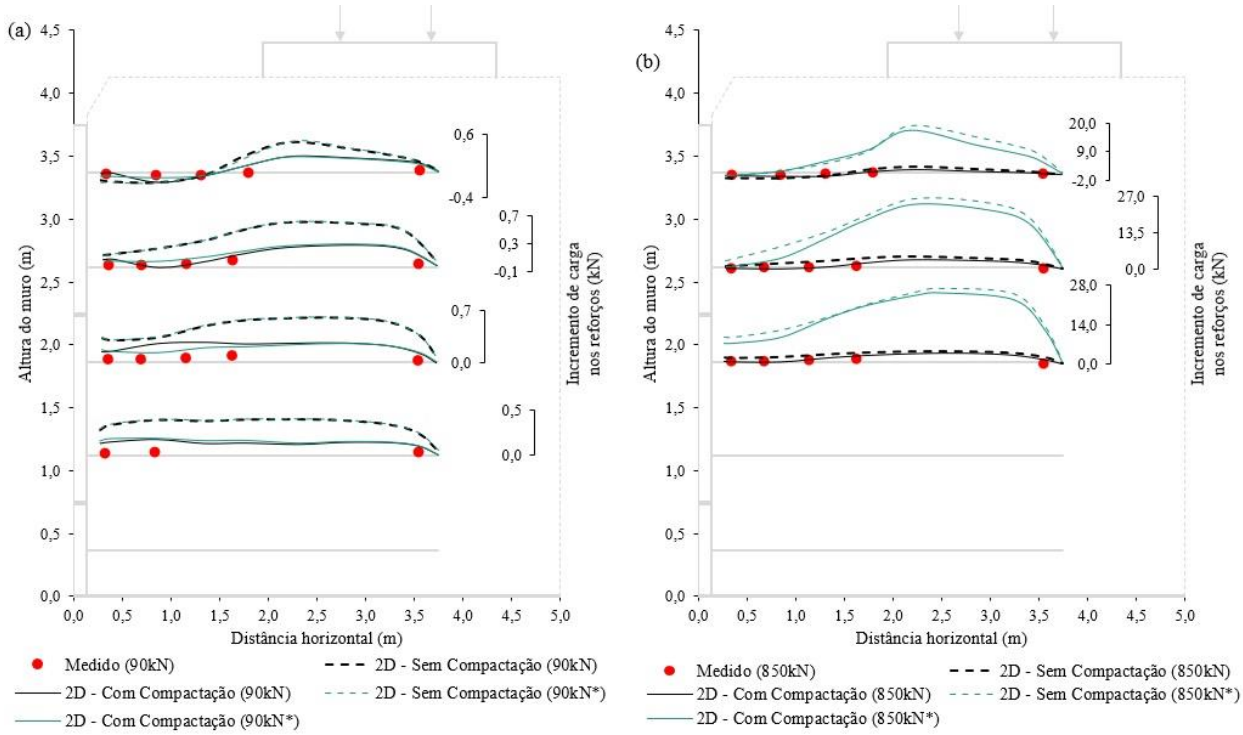


Figura 6. Incremento de carga nos reforços: (a) 90 kN; (b) 850 kN.

5 CONCLUSÕES

Este estudo investigou numericamente o comportamento tensão-deformação de um MSR em escala real, com tiras metálicas, submetido a carregamento localizado. A análise foi conduzida por meio de modelagem numérica bidimensional via Método dos Elementos Finitos, considerando diferentes formas de representação do carregamento localizado e a influência da TIC. Os resultados obtidos indicaram que a consideração da TIC, do comportamento tensão-deformação não linear do solo do aterro e da abordagem adotada para a modelagem do carregamento são aspectos fundamentais para reproduzir de forma satisfatória as tendências observadas nas medições de campo em condições de serviço.

Para a carga de 90 kN, inferior à TIC, a resposta do MSR mostrou-se pouco sensível à forma de representação do carregamento localizado, uma vez que o comportamento da estrutura foi predominantemente regido pela TIC. No entanto, à medida que a carga aplicada ultrapassa a TIC (caso de 850 kN), a forma de modelagem do carregamento passa a exercer influência predominante sobre a resposta da estrutura. Nesse contexto, as análises em que a carga foi distribuída ao longo de toda a largura do modelo tenderam a subestimar os deslocamentos e os incrementos de tração, enquanto a sua distribuição em uma largura reduzida (1 m) resultou na superestimação das respostas estruturais.

De modo geral, conclui-se que a representação bidimensional das sobrecargas localizadas está associada a simplificações que podem influenciar significativamente os resultados numéricos. Assim, para uma representação mais realista do comportamento tensão-deformação de MSR em situações semelhantes, análises tridimensionais podem ser necessárias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem imensamente à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFNOR (1992) *Exécution des terrassements, Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière*. NF P 11-300, Septembre, Paris, France.

Bourgeois, E., Soyez, L., Le Kouby, A. (2011) Experimental and numerical study of the behavior of a reinforced-earth wall subjected to a local load. *J. Comput. Geotech*. 38 (4), 515–525.

Bourgeois, E., Kouby, A.L., Soyez, L. (2012) Influence of the strip-backfill interaction model in the analysis of the behavior of a mechanical stabilized earth wall. *Soils and Foundations*. 52 (3), 550–561.

Damians, I.P., Bathurst, R.J., Josa, A., Lloret, A. (2014) Numerical analysis of an instrumented steel-reinforced soil wall. *Int. J. Geomech*. 15(1), 04014037.

Dyer, N.R., Milligan, G.W.E. (1984) A photoelastic investigation of the interaction of a cohesionless soil with reinforcement placed at different orientations. *In: Proc., Int. Conf. on in Situ Soil and Rock Reinforcement*.

Hung, C., Liu, C. H., Liu, H. (2021) Three-dimensional finite element analysis of geosynthetic-reinforced soil walls with turning corners. *J. Geotext. Geomembr*. 49 (3), 629–645.

Leite, V. B. F. (2025) *Estudo Numérico 2D e 3D do Efeito do Carregamento Externo no Comportamento Tensão-Deformação de uma Terra Armada em Aterro Ferroviário*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Liu, Y., Yao, Z., Liu, H., Shao, M., Zhao, Y. (2021) Mechanical Behavior of the Reinforced Retaining Wall Subjected to Static Load. *Advances in Civil Engineering*. vol. 2021, Article ID8844033, 10 pages.

Mirmoradi, S. H., Ehrlich, M. (2015) Modeling of the compaction-induced stress on reinforced soil walls. *J. Geotext. Geomembr*. 43 (1), 82–88.

Mirmoradi, S. H., and Ehrlich, M. (2018) Numerical simulation of compaction-induced stress for the analysis of RS walls under working conditions. *J. Geotext. Geomembr*. 46 (3): 354–365.

Profillidis, V. A. (2014) *Railway management and engineering*. 4a ed. Burlington, ASHGATE.

Reiffsteck, P. (2008) *Cours de Terre Armée*. ENS-Cachan. Material didático.

SNCF (1999) *Spécifications techniques pour la fourniture de granulats utilisés pour la réalisation et l'entretien de voies ferrées*. IN 0091, Mars 1999, Paris, France.

Société Terre Armée (2013) *Mur de soutènement TERRACLASS – Avis Technique M-001*. Transports Québec, Québec, Canadá.

Soyez, L. (2011) *Contribution à l'étude du comportement des ouvrages de soutènement en sol renforcé, soumis à des charges d'exploitation ferroviaire (charges dynamiques et cycliques)*. PhD thesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França.

Vadavadagi, S. S., Chawla, S. (2022) Effect of rail axle load on geosynthetic reinforced back-to-back mechanically stabilized earth walls: Experimental and numerical studies. *J. Transp. Geotech*. (38):100907.

Xu, P., Zhong, Y., Hatami, K., Yang, G., Liu, W., Jiang, G. (2024) Centrifuge and limit analysis investigation of hybrid wrapped-face, full-height panel MSE walls on clay foundations. *J. Transp. Geotech*. (48):101308.

Yu, Y., Bathurst, R. J., Allen, T. M. (2016) Numerical Modeling of the SR-18 Geogrid Reinforced Modular Block Retaining Walls. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 142 (5): 04016003.