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/COBRAMSEG2026.6/34

Efeitos de Vibrações Induzidas por Britadores de Mineração em Estruturas de Solo Reforçado com Geossintéticos

Kaio Morete Santos
Mestrando em geotecnia, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, kaio.morete@estudante.ufscar.br

Fernando Henrique Martins Portelinha
Professor Doutor, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

RESUMO: Os muros de solo reforçado com geossintéticos têm sido amplamente utilizados em empreendimentos minerários, especialmente como estruturas de suporte a britadores e áreas sujeitas ao tráfego de equipamentos pesados. Nesses contextos, além das solicitações estáticas usuais, essas estruturas podem estar submetidas a vibrações operacionais induzidas por equipamentos de britagem, cuja influência no comportamento global ainda é pouco explorada na literatura. O presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem numérica, a influência das vibrações induzidas por britadores no desempenho de muros de solo reforçado com geossintéticos. Inicialmente, foi realizada a calibração do modelo com base em estudo experimental consagrado da literatura. Em seguida, foram simuladas condições típicas de aplicação em mineração, considerando diferentes cenários de carregamento dinâmico e configurações de apoio da superestrutura. As análises foram conduzidas no *software* PLAXIS 2D, utilizando o modelo constitutivo *Hardening Soil* com *Small Strain Stiffness* (*HSsmall*). Os resultados indicam que as vibrações operacionais promovem incrementos localizados nos deslocamentos e nas deformações internas, sem, contudo, ocasionar instabilidade global ou amplificações significativas quando comparadas às condições estáticas de projeto. Observou-se ainda que a configuração de engastamento influencia a redistribuição de esforços e os padrões de deformação.

PALAVRAS-CHAVE: solo reforçado com geossintéticos, vibrações induzidas, britadores, mineração, modelagem numérica.

ABSTRACT: Reinforced soil walls with geosynthetics have been widely applied in mining projects, particularly as support structures for crushers and areas subjected to heavy equipment traffic. In such conditions, beyond conventional static loads, these structures may also be exposed to operational vibrations induced by crushing equipment, whose influence on global behavior remains insufficiently explored in the literature. This study aims to evaluate, through numerical modeling, the influence of crusher-induced vibrations on the performance of geosynthetic reinforced soil walls. Initially, the numerical model was calibrated based on a well-established experimental study from the literature. Subsequently, typical mining conditions were simulated, considering different dynamic loading scenarios and support configurations of the superstructure. The analyses were performed using PLAXIS 2D, adopting the Hardening Soil model with Small-Strain Stiffness (HSsmall). The results indicate that operational vibrations lead to localized increases in horizontal displacements and internal deformations, without causing global instability or significant amplification when compared to static design conditions. It was also observed that the support condition significantly influences the redistribution of stresses and deformation patterns.

KEYWORDS: crushers, geosynthetic reinforced soil, induced vibrations, mining, numerical modeling.

1 INTRODUÇÃO

Os muros de solo reforçado com geossintéticos têm se consolidado como uma solução amplamente empregada para estabilização de taludes, em função de vantagens como rapidez construtiva, elevada resistência à tração, viabilidade econômica e bom desempenho sob solicitações sísmicas (Evirgen *et al.*, 2017; Mafia, 2020; Chaitanya e Karpurapu, 2023). No contexto brasileiro, a aplicação é fortemente associada à mineração,

sendo utilizados como acessos, contenções e, especialmente, como estruturas de suporte a britadores, em um cenário de crescente mecanização das operações (Terefe e Tefera, 2019; Yamashita *et al.,* 2021).

Nessas aplicações, além dos carregamentos estáticos, essas estruturas estão sujeitas a ações dinâmicas induzidas por vibrações operacionais, que podem se propagar ao maciço por meio da fundação ou do contato direto com a superestrutura, influenciando seu desempenho. Apesar da relevância prática, estudos específicos sobre o comportamento de muros de solo reforçado em ambiente minerário ainda são limitados. Revisões recentes, abrangendo informações de 1985 a 2023, indicam avanço nas pesquisas, sobretudo em estabilidade sísmica e modelagem numérica, mas apontam lacuna quanto à aplicação em mineração (Malekmohammadi e Damians, 2024).

2 METODOLOGIA

A estratégia de modelagem adotada neste estudo baseia-se na integração de abordagens consolidadas da literatura, tendo como referência o modelo experimental e numérico proposto por Hatami e Bathurst (2005), reconhecido por sua capacidade de representar adequadamente o comportamento de muros de solo reforçado, a partir do qual foram incorporadas adaptações voltadas à simulação de condições típicas do contexto minerário, conforme abordagens descritas por Ananias *et al.* (2014).

A calibração numérica foi realizada no *software* PLAXIS 2D, versão 20.2.0.83, sendo posteriormente introduzidas modificações na geometria, nas condições de carregamento e na configuração estrutural, com o objetivo de representar de forma mais realista os muros de solo reforçado empregados no ambiente industrial, como é posto na sequência.

2.1 Modelagem numérica e carregamento dinâmico

A estrutura adotada como base para o presente estudo é apresentada na Figura 1, em vista frontal, e na Figura 2, em seção. Trata-se de um muro de solo reforçado com 20 metros de altura e inclinação de face semivertical (87°), composto por reforços do tipo geogrelha dispostos horizontalmente ao longo da altura da estrutura. Os reforços são distribuídos com espaçamento vertical constante de 0,50 m, sendo empregados três níveis distintos de rigidez, organizados em camadas ao longo do maciço reforçado. A face do muro é constituída por elementos modulares do tipo *terramesh*, e o maciço é formado por solo de aterro compactado.

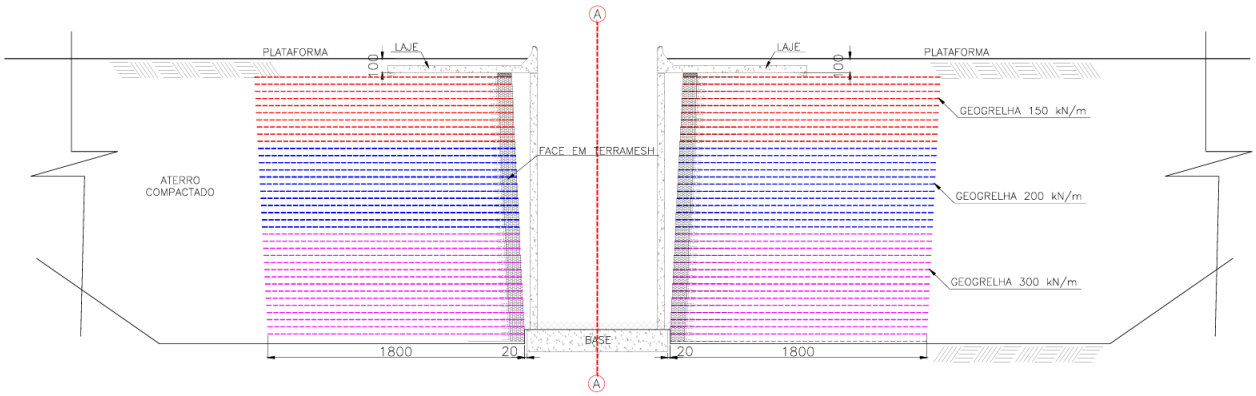


Figura 1. Representação frontal elaborada para simular a vista frontal da estrutura conceitual de referência do estudo.
Fonte: próprio autor baseado em Ananias *et al.* (2014).

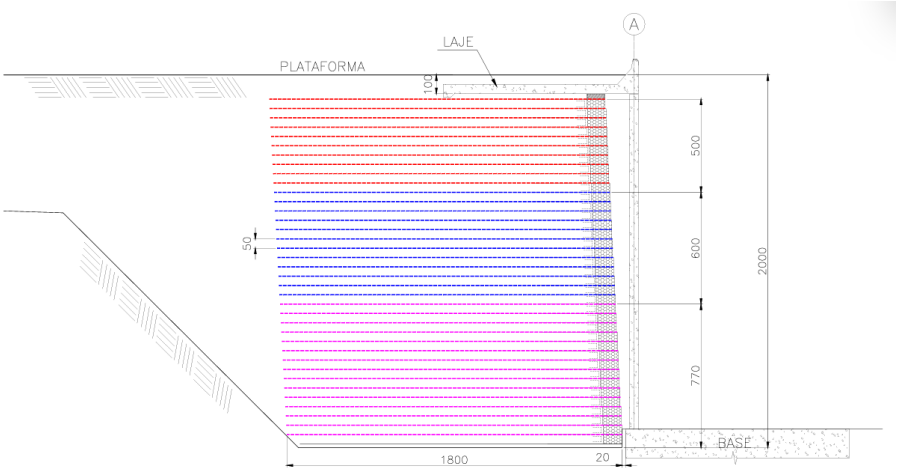


Figura 2. Seção típica A–A do muro de solo reforçado adotado como referência conceitual para o presente estudo – cotas em centímetros.
Fonte: modificado de Ananias *et al.* (2014).

A análise numérica foi conduzida por meio de estágios construtivos, com incrementos de altura compatíveis com o espaçamento entre reforços, totalizando 40 etapas de construção. A malha adotada foi composta por elementos triangulares de 15 nós, resultando em 45.185 nós e 5.446 elementos. O modelo foi desenvolvido no *software* PLAXIS 2D, versão 20.2.0.83.

Em cada etapa construtiva, foram considerados os efeitos da compactação do aterro, por meio da aplicação da metodologia do tipo II proposta por Mirmoradi e Ehrlich (2018). Ao final da construção, foram aplicados carregamentos incrementais de 10 kPa no topo da estrutura, até se atingir o valor de 100 kPa, correspondente à carga de projeto adotada por Ananias *et al.*, (2014). O modelo resultante modelado na ferramenta numérica é representado na Figura 3.

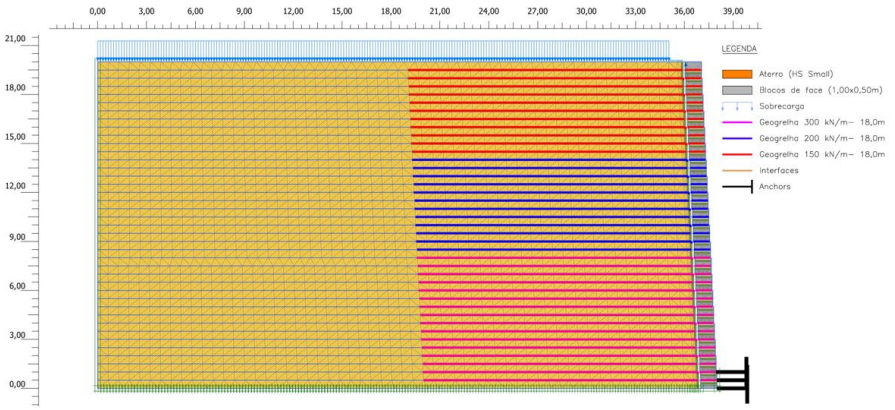


Figura 3. Geometria, condições de contorno e malha utilizada na modelagem numérica.

2.1.1 Modelagem dos materiais

A modelagem dos materiais seguiu a parametrização definida quando da calibração numérica. O aterro foi modelado como um solo homogêneo, isotrópico e elasto-plástico não linear, adotando o critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* e comportamento dilatante. Trata-se de uma areia mal graduada (SP), com peso específico de 16,8 kN/m³, ângulo de atrito efetivo de 44° e ângulo de dilatância de 8°. Para representar adequadamente a dependência da rigidez com o nível de tensão e o comportamento em pequenas deformações, foi utilizado o modelo constitutivo *Hardening Soil with Small-Strain Stiffness* (*HSsmall*). Os principais parâmetros incluem: E_{50} = 56.667 kN/m², E_{oed} = 47.220 kN/m², E_{ur} = 170.000 kN/m², ν = 0,25, G_0 = 300.000 kN/m² e $\gamma_{0,7}$ = 0,0002.

Os reforços foram representados por geogrelhas do tipo MacGrid® WG, modeladas como elementos de tração com comportamento linear-elástico e rigidez axial constante de 300, 200 e 150 kN/m, como é

apresentado na Figura 1. O comprimento dos reforços foi de 18 metros. A ancoragem das geogrelhas foi simulada por sua inserção sob os elementos de face, aproveitando as tensões verticais atuantes, em função de limitações do *software*.

A face do muro foi modelada por blocos segmentais de concreto, seguindo a validação numérica, considerados como material homogêneo, isotrópico e linear-elástico, com módulo de elasticidade de $23{,}0 \times 10^6$kN/m², coeficiente de *Poisson* de 0,15 e peso específico de 21,8 kN/m³. As interfaces solo-bloco e bloco-bloco foram simuladas pelo modelo de *Mohr-Coulomb*, com parâmetros reduzidos de resistência e rigidez, de modo a representar adequadamente as interações mecânicas entre os elementos estruturais e o solo.

2.1.2 Carregamento dinâmico

Em função da ausência de dados diretos na literatura quanto às acelerações efetivamente transmitidas por britadores em muros de solo reforçado, adotou-se uma abordagem paramétrica, fundamentada em informações indiretas disponíveis. As faixas de frequência consideradas foram baseadas em dados típicos de operação de britadores, que indicam valores entre aproximadamente 1,4 e 16,7 Hz (Wills, 2016). Para a definição das amplitudes de aceleração, foram utilizados registros experimentais disponíveis na literatura, originalmente associados ao comportamento dinâmico de equipamentos mecânicos, os quais foram posteriormente normalizados em relação à aceleração da gravidade, conforme apresentado no item correspondente. A partir desses dados, foram definidos diferentes cenários de carregamento dinâmico, combinando níveis distintos de aceleração e frequência, de modo a representar condições de baixa, média e alta intensidade.

Adicionalmente, considerando que a forma de transferência da vibração para o maciço não é claramente estabelecida, adotou-se uma abordagem conservadora quanto à direção de aplicação dos carregamentos. Com base em estudos experimentais sobre propagação de vibrações no solo (Massarsch, 1999; Chen *et al.*, 2019), as acelerações foram aplicadas de forma simultânea nas direções vertical e horizontal, uma vez que, mesmo em sistemas com excitação predominantemente vertical, são observadas componentes horizontais significativas no campo de resposta do solo. Os registros definidos com diferentes amplitudes e frequências de aceleração são mostrados na Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

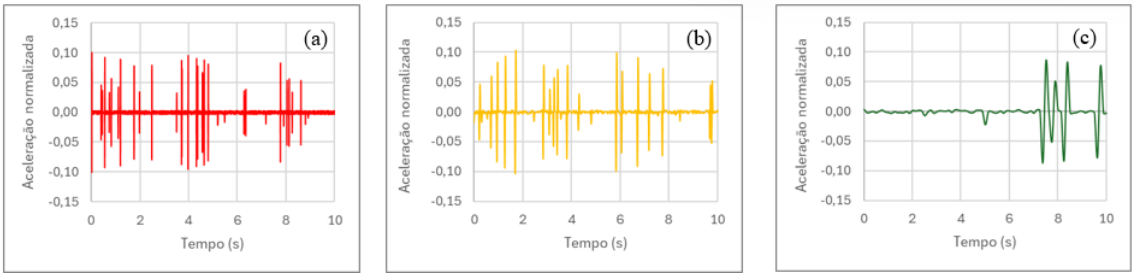


Figura 4. Representação gráfica dos sismos induzidos utilizados. Aceleração média normalizada de 0,003 e aceleração de pico normalizada de 0,10: (a) f = 2,81 Hz; (b) f = 1,79 Hz; (c) f = 0,79 Hz.

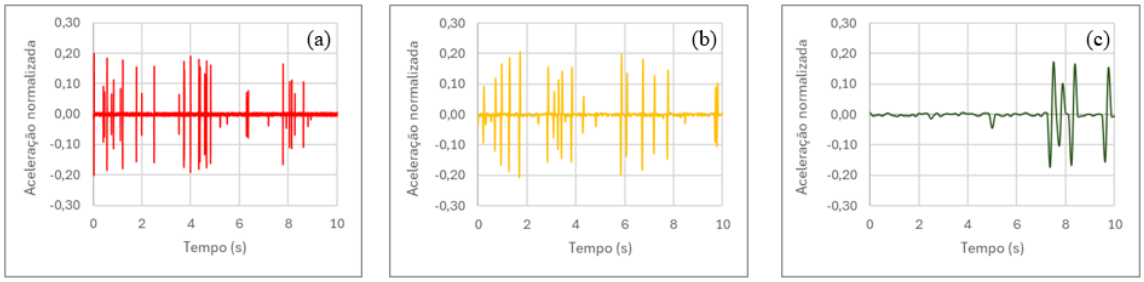


Figura 5. Representação gráfica dos sismos induzidos utilizados. Aceleração média normalizada de 0,006 e aceleração de pico normalizada de 0,20: (a) f = 2,81 Hz; (b) f = 1,79 Hz; (c) f = 0,79 Hz.

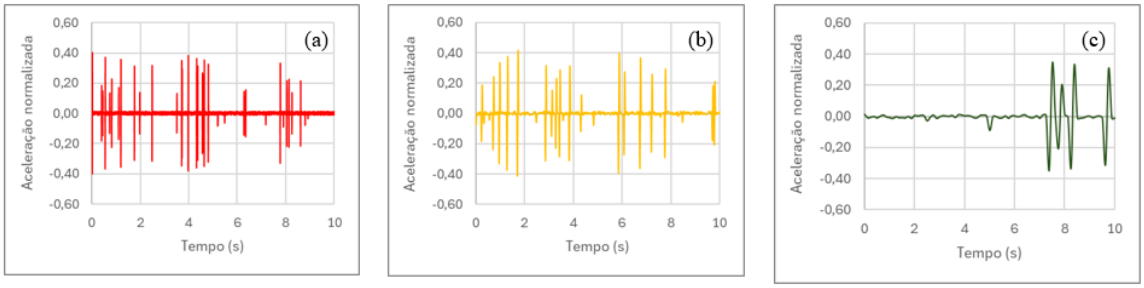


Figura 6. Representação gráfica dos sismos induzidos utilizados. Aceleração média normalizada de 0,012 e aceleração de pico normalizada de 0,40: (a) f = 2,81 Hz; (b) f = 1,79 Hz; (c) f = 0,79 Hz.

2.1.3 Condições de engastamento e modelagem dos materiais

Diante da incerteza quanto à forma de interação entre a estrutura de suporte do britador e o muro de solo reforçado, foram analisadas duas condições representativas de vinculação: (i) engastamento no topo, caracterizando um contato localizado entre a estrutura e o muro; e (ii) engastamento em 5 pontos ao longo da altura do muro, representando uma condição mais rígida de vinculação. As reações associadas a essas condições foram previamente estimadas por meio de modelagem estrutural, sendo posteriormente aplicadas ao modelo geotécnico, contemplando tanto os carregamentos estáticos quanto os efeitos dinâmicos associados à vibração do equipamento. A representação dos carregamentos impostos, os valores utilizados bem como o local de engastamento são representados na Figura 7.

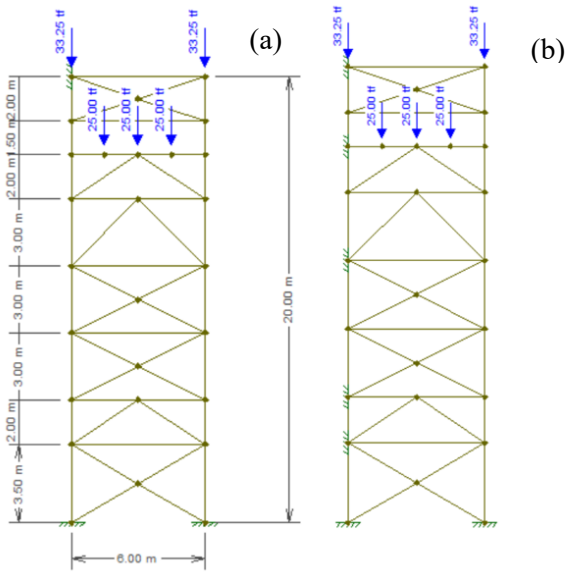


Figura 7. Posições de engaste da torre do britador com o muro de solo reforçado: (a) 1 apoio de terceiro gênero e dimensões da torre; (b) 5 apoios de terceiro gênero.

No que se refere à modelagem dos materiais, o reforço foi representado por elementos do tipo geogrelha, com rigidez definida a partir de dados de fabricante, considerando níveis de deformação compatíveis (2%) com condições de campo, resultando em 2750 kN/m, 2050 kN/m e 1300 kN/m, desde a base até o topo. O aterro, a face e as interfaces foram modelados conforme a etapa de validação numérica, com ajustes pontuais visando melhor representar o comportamento da estrutura nas condições analisadas.

3 RESULTADOS

A avaliação dos resultados foi conduzida a partir da análise dos deslocamentos horizontais da face e da distribuição das tensões verticais na base do muro, visando compreender o comportamento global da estrutura frente às diferentes condições de carregamento e configurações de engastamento consideradas.

3.1 Deslocamentos de face

A avaliação dos resultados foi conduzida com base nos deslocamentos horizontais da face, considerando duas condições de engastamento: no topo e distribuído ao longo da altura do muro, como foi descrito à priori. A Figura 8 apresenta as deformadas obtidas, enquanto a Tabela 1 sintetiza os valores máximos encontrados nas análises.

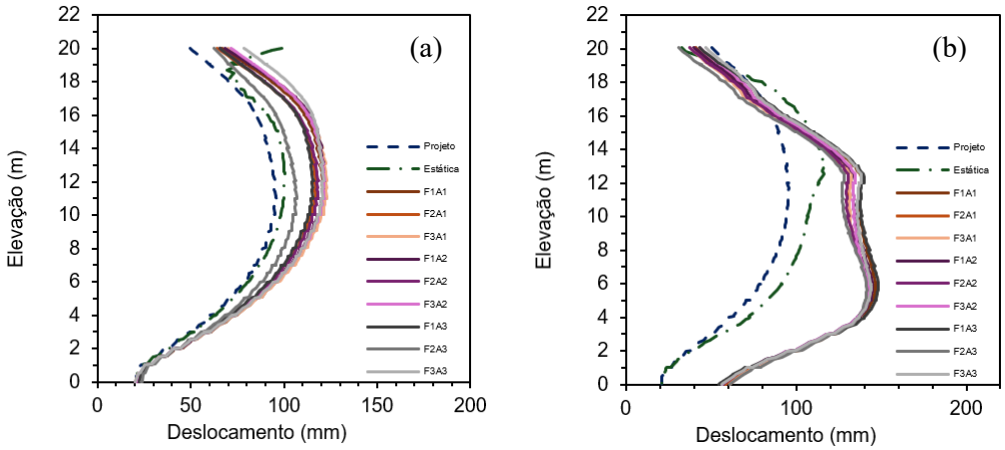


Figura 8. Deslocamentos de face: (a) cenário de engastamento 1 e (b) cenário de engastamento 2.

Tabela 1. Deslocamentos horizontais máximos dos cenários 1 e 2 de engastamento.

Análise	Deslocamento (mm) - cenário 1	Deformação ε (%) - cenário 1	Deslocamento (mm) - cenário 2	Deformação ε (%) - cenário 2
Projeto	95,95	0,48%	95,95	0,48%
Estática	100,29	0,50%	116,70	0,58%
F1A1	121,22	0,61%	146,81	0,73%
F2A1	117,24	0,59%	143,55	0,72%
F3A1	123,20	0,62%	143,87	0,72%
F1A2	121,68	0,61%	144,87	0,72%
F2A2	118,52	0,59%	142,93	0,71%
F3A2	121,89	0,61%	142,67	0,71%
F1A3	115,78	0,58%	148,39	0,74%
F2A3	106,99	0,53%	141,47	0,71%
F3A3	121,20	0,61%	143,99	0,72%

De forma geral, a condição de projeto, considerando apenas o carregamento distribuído de 100 kPa, apresentou deslocamento máximo da ordem de 96 mm (≈0,48%). A inclusão da carga estática, condição corresponde à aplicação das reações nos pontos de engastamento entre a torre e o muro, sem a consideração das ações dinâmicas induzidas pela vibração associada à estrutura do britador, resultou em comportamentos distintos. Para o engastamento no topo, observou-se incremento discreto, atingindo aproximadamente 100 mm (≈0,50%), com maior mobilização na região superior do muro. Por outro lado, no engastamento distribuído, o aumento foi mais significativo, alcançando cerca de 117 mm (≈0,58%), além de promover maior mobilização da região inferior, indicando maior participação do pé do muro na acomodação das solicitações.

A consideração do carregamento dinâmico promoveu incremento adicional dos deslocamentos em ambos os cenários. No engastamento no topo, os valores variaram entre aproximadamente 107 mm e 123 mm (≈0,53% a 0,62%), enquanto, no engastamento distribuído, variaram entre aproximadamente 141 mm e 148

mm (≈0,71% a 0,74%). Apesar desses incrementos, não foi observada tendência clara de aumento dos deslocamentos com a variação de frequência ou amplitude das excitações.

Em termos absolutos, o acréscimo máximo foi da ordem de 27 mm (≈28%) para o engastamento no topo e de aproximadamente 52 mm (≈50%) para o engastamento distribuído, quando comparados à condição de projeto. Ainda assim, todos os resultados permaneceram significativamente inferiores ao limite de 2% da altura do muro recomendado pela FHWA (Adams e Nicks, 2018), indicando desempenho adequado da estrutura.

3.2 Tensão mobilizada na base

Com relação às tensões verticais na base do muro, a avaliação foi conduzida de forma normalizada ($\sigma_v/\gamma H$), com o objetivo de permitir a comparação entre os diferentes cenários analisados, bem como eliminar a influência direta da altura da estrutura na interpretação dos resultados.

Na região mais próxima à face, observou-se uma redução local das tensões normalizadas, seguida por um pico acentuado imediatamente adjacente, comportamento associado às condições de contorno impostas pela presença dos blocos de face e pela interação solo–estrutura. A variação é compatível com o mecanismo de redistribuição de tensões nessa região, no qual ocorre alívio local, possivelmente relacionado à deslocamento do sistema de face no sentido de desconfinamento do solo de aterro, seguido por concentração de tensões decorrente da transferência de carga entre os elementos estruturais da face.

Comparando os cenários, verifica-se que o cenário 2 apresenta uma tendência mais pronunciada de redução das tensões ao longo da base, atingindo valores menores na região mais próxima à face. Por outro lado, no cenário 1, a distribuição permanece mais uniforme ao longo de uma extensão maior do reforço. Não obstante, os resultados indicam que as condições de engastamento do britador-muro de solo reforçado bem como os cenários dinâmicos avaliados praticamente não influenciam na tensão da base do modelo.

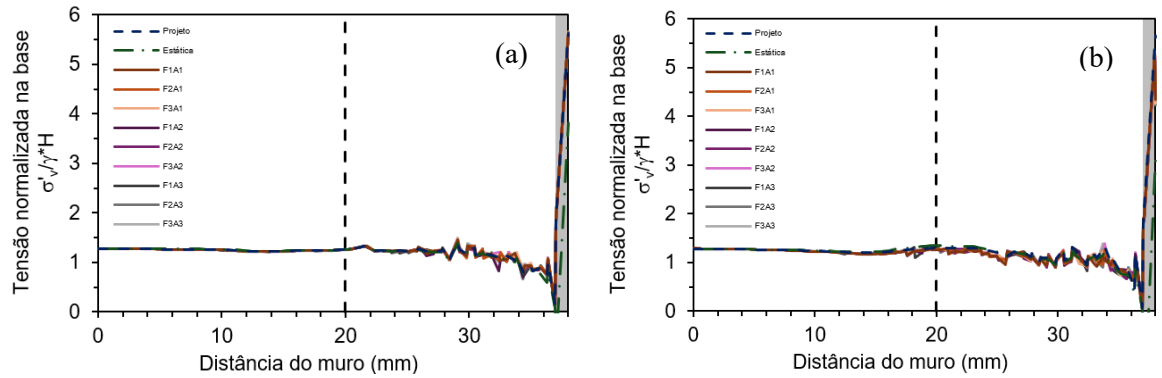


Figura 9. Tensão normalizada na base do modelo: (a) cenário de engastamento 1 e (b) cenário de engastamento 2.

4 CONCLUSÕES

O estudo avaliou, por meio de modelagem numérica em elementos finitos, a influência de vibrações de britadores nos deslocamentos horizontais de muros de solo reforçado, considerando duas condições de acoplamento estrutural: engastamento no topo e engastamento distribuído ao longo de cinco pontos na altura do muro. Os resultados indicaram que a inclusão das ações dinâmicas promove incremento dos deslocamentos horizontais, mais pronunciado na condição de engastamento distribuído, além de evidenciarem capacidade de modificação expressiva da forma da deformada ao longo da altura do muro, em função da condição de acoplamento adotada.

Ademais, foi observada baixa sensibilidade da resposta estrutural às variações de frequência e amplitude consideradas, sendo a condição de engastamento o fator predominante no comportamento do sistema. Apesar dos incrementos observados, os deslocamentos permaneceram inferiores ao limite de 2% da altura do muro, conforme recomendado pela *Federal Highway Administration* – FHWA (Adams e Nicks, 2018), indicando desempenho adequado da estrutura nas condições analisadas. Contudo, os resultados evidenciam que a

desconsideração das ações dinâmicas pode levar à subestimação dos deslocamentos, sobretudo em cenários com maior rigidez de acoplamento entre a superestrutura e o maciço reforçado.

No que se refere às tensões mobilizadas na base do modelo, verificou-se distribuição global semelhante entre os cenários analisados, com variações localizadas na região próxima à face, caracterizadas por alívio seguido de concentração de tensões na face. Observou-se que, de forma geral, as condições de engastamento e os carregamentos dinâmicos exerceram influência limitada sobre o padrão global de tensões na base do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, M., Nicks, J. (2018). *Design and Construction Guidelines for Geosynthetic Reinforced Soil Abutments and Integrated Bridge Systems*. 1st ed. McLean, Virginia, VA, USA, 225 p.

Ananias, E. J., Campos, G. O., Silveira, J. F. S., Mendonça, C. T. (2014). Estudo de caso: solo reforçado em terramesh e geogrelhas para a contenção de britagem primária em mineração – Alto Horizonte/GO – projeto, execução, controle e desempenho. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2014, Goiânia. *Anais...* ABMS.

Ardila-Montilla, E. L. (2023). *Estudo do desempenho de estruturas portantes de solo reforçado com geossintéticos GRS-IBS sob a ação de sismos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 122 p.

Chaitanya, B., Karpurapu, R. (2023). Dynamic response of geosynthetic reinforced soil walls under seismic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 51 (2), p. 356–370.

Chen, A., Cheng, F., Wu, D., Tang, X. (2019). Ground vibration propagation and attenuation of vibrating compaction. *Journal of Vibroengineering*, 21 (5), p. 1342–1352.

Evirgen, B., Tatsuoka, F., Ishihara, K. (2017). Seismic performance of geosynthetic-reinforced soil structures. *Geosynthetics International*, 24 (5), p. 493–509.

Hatami, K., Bathurst, R. J. (2005). Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (4), p. 1066–1085.

Mafia, G. A. (2020). *Estudo da distribuição dos reforços em muros portantes de solos reforçados com geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, 112 p.

Malekmohammadi, K., Damians, I. P. (2024). A bibliometric review of reinforced soil wall research topics. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10 (42), p. 1–16.

Massarsch, K. R. (2002). Effects of vibratory compaction. In: International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Louvain-la-Neuve. *Keynote Lecture*, p. 33–42.

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

Terefe, T. O, Tefera, G. A. (2019). Design of impact stone cruscher machine. International Journal of Scientific & Engineering Research, 10 (5), p. 904-909.

Wills, B. A., Finch, J. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*. 8th ed. Oxford, OX, UK, 498 p.

Yamashita, A. S., Thivierge, A., Euzébio, T. A. M. (2021). A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, 170 (107036), p. 1–17.