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/COBRAMSEG2026.5/46

Controle de Recalques Diferenciais com Inclusões Rígidas em Solos Colapsíveis no Encontro de um Viaduto

Juan Felix Rodrguez Rebolledo
Professor, PPG-Geotecnia, UnB, Brasília, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

Carlos Medeiros Silva
Diretor Técnico, EMBRE Engenharia e Fundações, Brasíla, Brasil carlos@embre.com.br

Laura Natalia Cucaita Vargas
Estudante de Doutorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, nataliacucaitav@gmail.com

Raquel Pascally do Nascimento Ferreira
Estudante de Mestrado, PPG-Geotecnia, UnB, Brasília, Brasil, raquelpascally@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho analisa o desafio dos solos colapsíveis em obras de infraestrutura no Centro-Oeste brasileiro, focando no encontro de um viaduto em Planaltina-DF. O subsolo local, composto por argila arenosa porosa de baixa resistência, apresenta elevado potencial de colapso por umedecimento, com recalques estimados em até 23 cm em ensaios edométricos. O estudo avaliou o uso de inclusões rígidas como estratégia para aumentar a rigidez do subleito e mitigar recalques diferenciais na transição entre o aterro e a estrutura de concreto. A metodologia envolveu modelagem numérica no software Plaxis 3D, utilizando o modelo Barcelona Basic Model (BBM) para simular a variação de sucção. Os resultados indicaram que, sem reforço, os recalques atingiriam 42 cm; contudo, a implementação de inclusões rígidas reduziu esse valor para 9 cm, representando uma diminuição de 80% e proporcionando uma transição de rigidez mais suave. Conclui-se que as inclusões rígidas são uma solução eficiente para o controle de deformações em solos colapsíveis, sendo fundamental a associação com sistemas de drenagem e instrumentação de campo para garantir a durabilidade e o desempenho global da infraestrutura viária.

PALAVRAS-CHAVE: solos colapsíveis, encontro de um viaduto, recalques, modelagem numérica, modelo Barcelona Basic Model

ABSTRACT: This study analyzes the challenge of collapsible soils in infrastructure works in Brazil's Midwest, focusing on the junction of a viaduct in Planaltina-DF. The local subsoil, composed of porous sandy clay with low resistance, presents a high potential for collapse due to wetting, with estimated settlements of up to 23 cm in oedometer tests. The research evaluated the use of rigid inclusions as a strategy to increase the stiffness of the subgrade and mitigate differential settlements at the transition between the embankment and the concrete structure. The methodology involved numerical modeling using the Plaxis 3D software, employing the Barcelona Basic Model (BBM) to simulate suction variation. Results indicated that without reinforcement, settlements would reach 42 cm; however, the implementation of rigid inclusions reduced this value to 9 cm, representing an 80% decrease and providing a smoother stiffness transition. It is concluded that rigid inclusions are an effective solution for controlling deformations in collapsible soils, with the association of drainage systems and field instrumentation being essential to ensure the durability and overall performance of road infrastructure.

KEYWORDS: collapsible soils, junction of a viaduct, settlements, numerical modeling, Barcelona Basic Model

1 INTRODUÇÃO

Os solos colapsíveis representam um desafio significativo para obras de infraestrutura no Centro-Oeste brasileiro, especialmente nas interfaces de obras de arte especiais, onde a variação de rigidez entre o aterro e

a estrutura de concreto pode amplificar os recalques diferenciais. Este estudo apresenta uma investigação realizada no viaduto localizado em Planaltina-DF, onde o subsolo é composto por argila arenosa vermelha porosa, caracterizada por baixa resistência (N_{SPT} < 5 golpes) e elevada suscetibilidade ao colapso em decorrência do umedecimento.

Ensaios edométricos simples e duplos, realizados em amostras da camada crítica (1,5–6,0 m), indicaram potenciais de colapso variando entre 0,35% e 4,6%, correspondendo a recalques potenciais de até 23 cm apenas nesse horizonte. Diante dessas condições, foi avaliada a adoção de inclusões rígidas (solo-cimento ou concreto) como mecanismo para aumentar a rigidez do subleito do aterro de encontro, redistribuir tensões e reduzir deformações diferenciais ao longo da transição entre o aterro e o viaduto.

A análise numérica foi conduzida utilizando o software Plaxis 3D, adotando o modelo Hardening Soil (HSM, Schanz et al., 1999; Bentley, 2024a) para os solos menos deformáveis e o modelo Barcelona Basic Model (BBM, Alonso et al., 1990; Bentley, 2024b) para representar o colapso induzido por variações de sucção na argila porosa. Dois cenários foram comparados: (i) aterro executado sem inclusões rígidas e (ii) aterro reforçado com inclusões de diâmetro entre 50 e 70 cm.

O estudo demonstra que as inclusões rígidas constituem uma solução eficaz para obras sobre solos colapsíveis, especialmente nas interfaces de pontes, onde a compatibilização de rigidez é fundamental para o desempenho global e a durabilidade da infraestrutura. Recomenda-se a instrumentação do aterro durante a construção, bem como a implementação de medidas permanentes de drenagem para minimizar as variações de umidade no maciço.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROJETO

2.1 Localização

O trecho de estudo está situado na interseção entre a via BR-20/DF e a via DF128, no município de Planaltina, Distrito Federal, Figura 1. Os muros de arrimo analisados neste estudo são os da via BR-20/DF, com um comprimento total da ordem de 140 m, e altura máxima de aproximadamente 6,4 m.



Figura 1. Localização do local de estudo.

2.2 Informações geotécnicas

A caracterização geotécnica da área foi realizada por meio de 17 sondagens a percussão simples, distribuídas ao longo da interseção entre as vias BR-20/DF e DF-128. As profundidades das sondagens variam entre 10 e 15 metros, permitindo uma avaliação detalhada do perfil do solo na região.

Com base nos perfis geotécnicos obtidos e apresentados na Figura 2, foram identificadas quatro principais camadas de solo:

1. **Camada superficial de aterro (0 a 1,5 m)**: Esta camada é composta por material de aterro, localizada entre a superfície e 1,5 metro de profundidade.
2. **Argila arenosa vermelha, colapsível (1,5 a 6 m)**: A segunda camada consiste em argila arenosa de cor vermelha, com consistência variando de muito mole a mole (N_{SPT} < 5). Este tipo de solo é reconhecido por sua colapsibilidade.

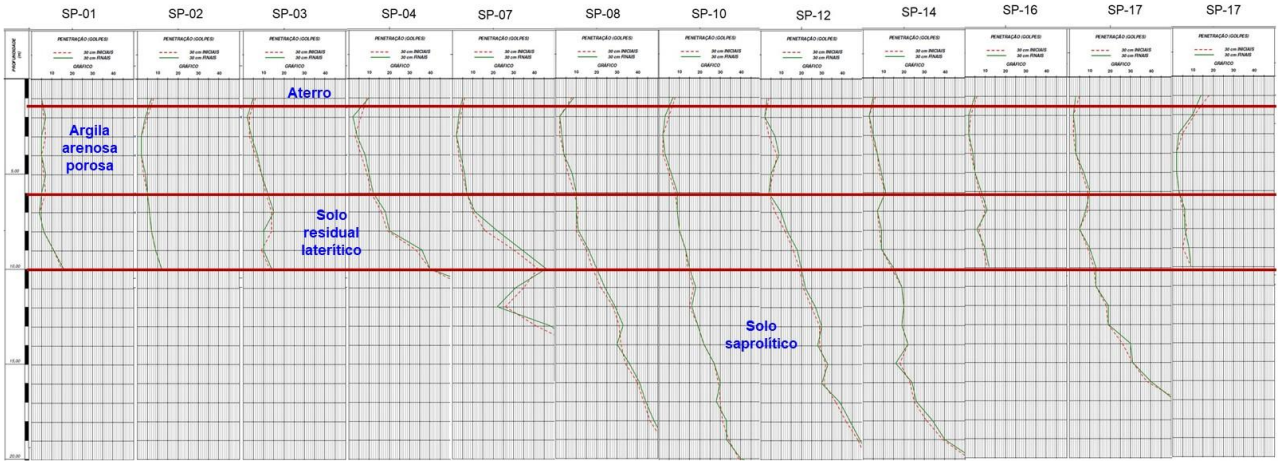


Figura 2. Perfil estratigráfico do trecho de estudo

3. **Solo residual laterítico (6 a 10 m)**: Entre 6 e 10 metros de profundidade, encontra-se um solo residual laterítico, composto principalmente por argila com pedregulho de cor amarelada e consistência variando de mole a média ($5 < N_{SPT} < 15$).
4. **Solo provavelmente saprolítico (10 a 20 m)**: A partir de 10 até 20 metros de profundidade, há uma camada de solo provavelmente saprolítico, formada por argila com fragmentos de rocha e consistência de média a dura ($N_{SPT} > 15$).

É importante destacar que a camada de argila arenosa vermelha (1,5 a 6 m), típica da zona de projeto e dos solos tropicais superficiais do Distrito Federal, apresenta baixa resistência à penetração, altos índices de vazios e uma estrutura altamente instável quando submetida a aumento de umidade e/ou alteração no estado de tensões, podendo desenvolver variações de volume concomitantes com o fator indutor, fenômeno denominado colapso. Esse comportamento foi confirmado pelos ensaios de adensamento realizados, nos quais foram medidos potenciais de colapso variando de 0,35% a 4,6%. Para uma camada com espessura da ordem de 5 m, isso pode representar um recalque por colapso de 2 a 23 cm.

Conforme indicado na NBR 6122 (ABNT, 2022), item 7.5.3, é importante considerar a possibilidade de encharcamento em solos colapsíveis, devido a fatores como vazamentos de tubulações de água ou elevação do lençol freático. Essas características devem ser levadas em conta no projeto e no método construtivo. Assim, segundo a Norma, o fenômeno do colapso deve ser considerado nas análises de projeto. Sabe-se que os resultados das provas de carga, quando realizados em perfis de solo não saturados e na umidade natural, nem sempre refletem as condições reais que as fundações da edificação enfrentarão ao longo de sua vida útil, agravado pelo fato de que a condição de colapsibilidade do solo local está amplamente documentada na literatura técnica nacional e internacional.

De acordo com Camapum de Carvalho et al. (2015), o aumento da umidade resulta na redução da resistência nos contatos interpartículas, frequentemente devido à diminuição da sucção, rearranjo estrutural e uma nova condição de equilíbrio sob a carga atuante e o novo teor de umidade. A esse fenômeno, denomina-se colapso, conferindo o título de solo colapsível ou colapsável aos solos que experimentam este fenômeno. Embora o colapso tenha um significado amplo em engenharia, em Geotecnia, a palavra passou a expressar a redução de volume demonstrada por certos solos quando umedecidos. Nessa perspectiva, os solos são designados como verdadeiramente colapsíveis quando experimentam a redução de volume por umedecimento sob peso próprio e condicionalmente colapsíveis quando a redução de volume ocorre sob a ação de uma sobrecarga adicional.

Qualquer surgimento aleatório de uma fonte de água que inunde o solo colapsível, em quantidades suficientes e sob uma determinada tensão constante (peso próprio ou sobrecarga), resulta em colapso de sua estrutura. Algumas dessas eventuais inundações podem incluir infiltrações de água de chuva, rupturas de tubulações de esgoto ou água, fissuras em reservatórios enterrados, entre outras (Cintra, 1998; Cintra e Aoki, 2013).

2.3 Características dos Muros de Arrimo

Os muros de arrimo analisados neste projeto são compostos por aterros de solo compactado e reforçado. Apresentam uma altura máxima nos pontos de encontro de aproximadamente 6,4 m. A largura dos muros é de 35,2 m, e na base, prevê-se a implantação de uma camada de solo compactado com 1,5 m de espessura, o que contribui para a distribuição uniforme das cargas.

O comprimento total dos aterros pode alcançar até 260 m ao longo do trecho em estudo. Entretanto, a parte do aterro reforçado corresponde a aproximadamente 140 m, apresentando variações de altura entre 3 e 6,4 metros.

Como solução de fundação, para evitar recalques súbitos entre os apoios da estrutura da ponte, foi propôs o uso de inclusões de solo-cimento com diâmetros de 0,5 e/ou 0,7 m. Essas inclusões serão distribuídas da forma seguinte: o espaçamento será menor na parte próxima ao encontro, com 1,5 m, aumentando gradualmente até 3,0 m na seção mais afastada.

As inclusões são elementos cilíndricos ou prismáticos que não têm contato direto com a fundação (radier ou sapata) e podem ser inseridas no solo utilizando diversas técnicas, como estaca escavada, estaca encamisada, estaca cravada de concreto pré-moldado, estaca cravada de aço, microestaca, estaca hélice contínua, *low-pressure grouting*, *jet grouting* e colunas de brita. Essas opções representam qualquer tipo de fundação profunda que possua uma rigidez consideravelmente maior que a do solo de fundação reforçado (Rodríguez-Rebolledo et al., 2019).

Estudos fundamentados em análises numéricas, modelos em centrífuga geotécnica e experimentos físicos em escala real, conduzidos por Rodríguez-Rebolledo et al. (2019, 2022), Buritica-Garcia et al. (2021) e Santos-Neta et al. (2025), demonstram que a adoção de fundações com inclusões rígidas em solos colapsíveis do Distrito Federal constitui uma solução eficaz para o controle de recalques totais e diferenciais, tanto durante a construção quanto na fase de operação das estruturas. Essa abordagem pode reduzir os recalques totais calculados, incluindo o colapso, em até 80%.

Entretanto, a presença de uma plataforma de transferência de carga (solo compactado) posicionada entre a estrutura (solo reforçado) e o solo circundante resulta em um comportamento distinto em comparação ao método convencional de estacas. A camada de solo compactado desempenha um papel crucial na garantia da transferência de carregamento nas cabeças das inclusões rígidas, permitindo, assim, o desenvolvimento de recalques uniformes. Buritica-Garcia et al. (2021) comprovam que uma solução prática para a camada de distribuição de carga pode ser o uso do solo superficial laterítico, abundante na região do Distrito Federal, compactado, com ou sem cimento.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

3.1 Estratigrafia e Propriedades

Para a modelagem numérica, foi considerada a estratigrafia definida no item 2.2 (Figura 2). A simulação do comportamento do solo neste projeto apresenta um grau considerável de complexidade, devido ao caráter tridimensional do problema, à magnitude dos carregamentos transferidos para o subsolo e à possibilidade de colapso, tanto por peso quanto pela saturação da camada de argila arenosa porosa durante a operação da estrutura.

Modelos constitutivos tradicionais, como o Mohr-Coulomb, não são adequados para simular esse comportamento, uma vez que são modelos linear-perfeitamente plásticos. Isso implica que a rigidez não varia com o nível de tensões (sejam elas provenientes de carregamento ou descarregamento), e as deformações permanentes ocorrem apenas quando o solo se rompe. Neste estudo, utilizou-se o modelo Hardening Soil (HS, Schanz et al., 1999) do software Plaxis (Bentley 2024a), que permite simular as variações na rigidez cisalhante e volumétrica do solo em função do nível de tensões, empregando funções hiperbólicas que se ajustam de maneira mais precisa ao comportamento do solo.

Para simular o comportamento da argila arenosa porosa, foi adotada a versão implementada no Plaxis (Bentley, 2024b) do modelo Barcelona Basic Model (BBM, Alonso et al., 1990). Esse modelo possibilita representar o colapso do solo quando submetido a carregamentos e a alterações na umidade, que podem ocorrer durante as temporadas de chuvas ou em decorrência de vazamentos na rede de esgoto ou de água potável. As propriedades utilizadas para o modelo HS foram obtidas de Rodríguez-Rebolledo et al. (2019b), enquanto as do BBM de Santos-Neta et al. (2025).

3.2 Malha e Casos de Análise

Foi gerada uma malha de elementos finitos composta por 105.322 elementos tetraédricos, totalizando 151.851 nós (Figura 3), utilizando o software Plaxis 3D. As condições de contorno foram estabelecidas a uma distância suficiente para não influenciar o comportamento das estruturas. Devido à simetria transversal do problema, foi analisada apenas metade do aterro reforçado.

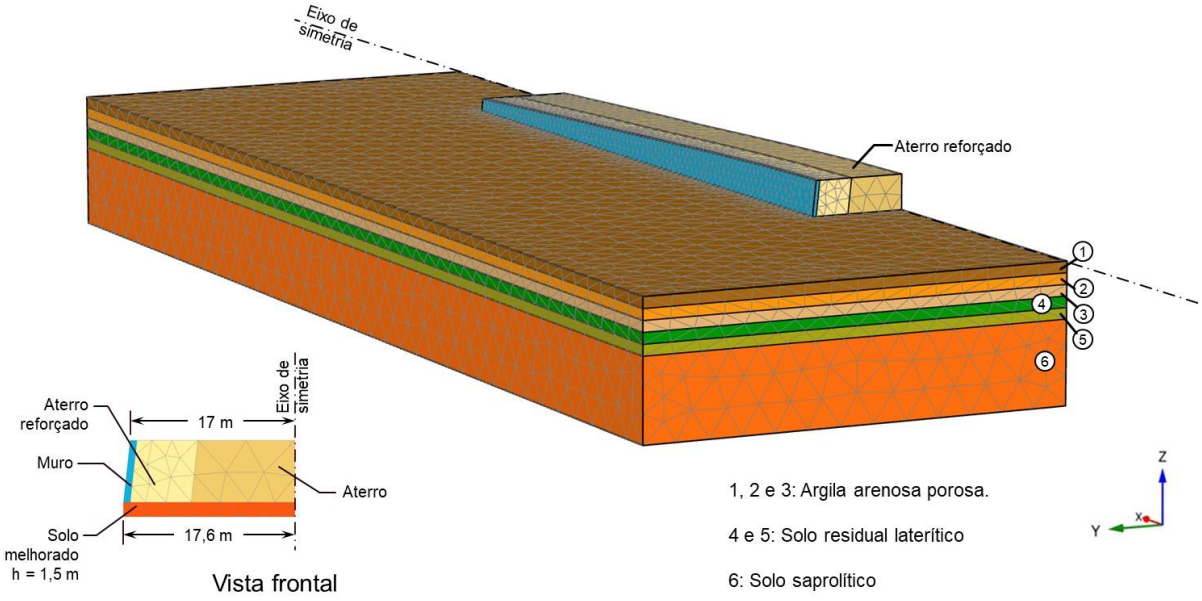


Figura 3. Caraterísticas gerais do modelo

Foram avaliados dois cenários: no primeiro, a magnitude dos recalques foi obtida pela simulação do aterro sem o reforço da fundação com inclusões rígidas. No segundo cenário, as inclusões rígidas foram incorporadas, permitindo a avaliação do desempenho do reforço.

Os recalques foram considerados tanto aqueles decorrentes da construção do aterro quanto os resultantes do colapso da camada de argila arenosa porosa. Adotou-se a hipótese de que os recalques iniciais ocorrerão e serão corrigidos durante a construção do aterro, enquanto os recalques por colapso podem manifestar-se a qualquer momento durante a vida útil da obra.

A distribuição e as características das inclusões rígidas estão apresentadas na Figura 4. Para garantir uma transição gradual dos recalques, foi necessária a inclusão de 132 elementos. As inclusões foram analisadas considerando diâmetros de 70 cm, compostas por solo-cimento, e de 50 cm, feitas de concreto de baixa resistência.

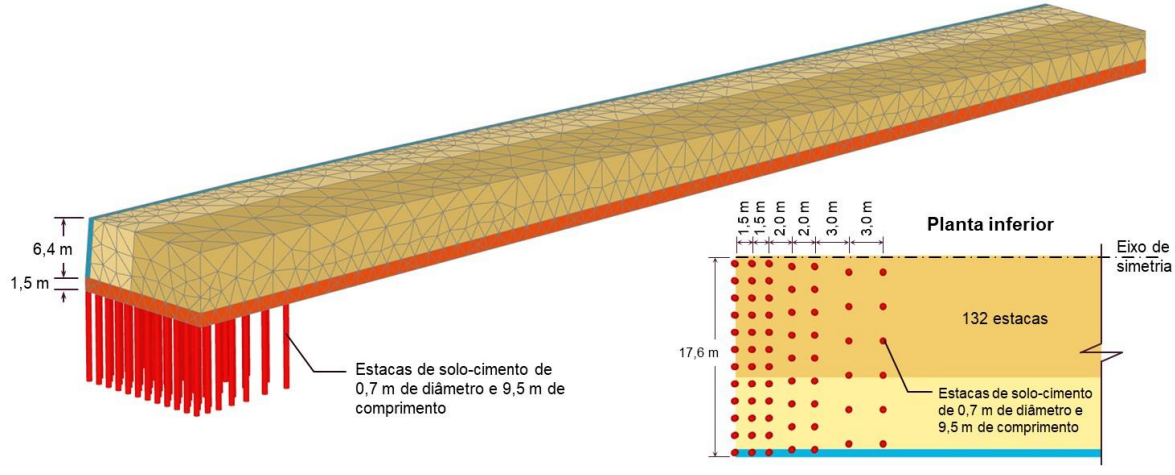


Figura 4. Imagem do modelo 3D com o reforço de inclusões rígidas.

4 RESULTADOS

4.1 Deslocamentos devido à construção

Os deslocamentos verticais resultantes da construção do aterro, tanto na ausência quanto na presença de reforço do subsolo por meio de inclusões rígidas, estão apresentados na Figura 5. No cenário sem reforço (Figura 5a), os recalques máximos registrados foram da ordem de 32 cm, concentrando-se na região de encontro do aterro. Em contrapartida, para o cenário reforçado (Figura 5b), os recalques máximos atingiram aproximadamente 30 cm, gerando uma zona de transição no encontro do aterro, onde os recalques variam de 8,5 cm a 30 cm ao longo de um trecho de aproximadamente 35 m.

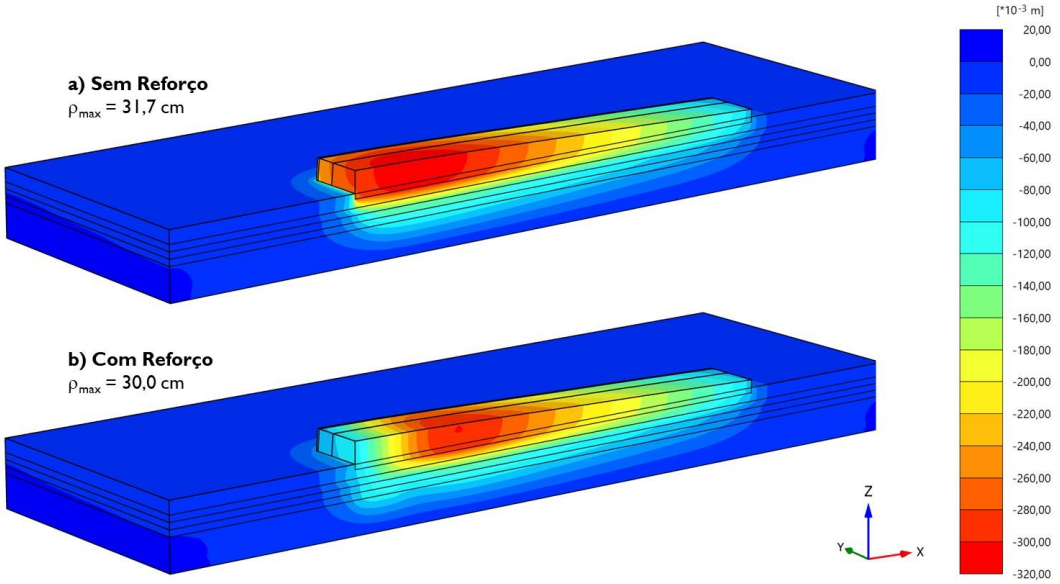


Figura 5. Deslocamentos verticais gerados na etapa de construção do aterro reforçado, a) sem e b) com inclusões rígidas.

É importante esclarecer que os resultados obtidos com inclusões de solo-cimento de 70 cm foram virtualmente equivalentes aos de inclusões de concreto de 50 cm. A principal diferença reside no fato de que as inclusões de concreto operam no limite de sua capacidade. No entanto, isso não representa um problema crítico, uma vez que a capacidade de carga do sistema é assegurada pela estrutura de solo compactado do próprio aterro, tornando as inclusões um recurso adicional para o controle dos recalques. Os recalques desenvolvidos nesta etapa serão ajustados automaticamente durante a construção do aterro, mediante a realização de nivelamentos topográficos.

4.2 Deslocamentos devido ao colapso

Os deslocamentos gerados pelo colapso da camada de argila arenosa porosa, com e sem inclusões rígidas, são apresentados na Figura 6. No cenário sem reforço (Figura 6a), os recalques máximos registrados foram da ordem de 17 cm, concentrando-se, assim como no item anterior, no encontro do aterro. Para o cenário reforçado (Figura 6b), os recalques máximos atingiram valores de 16 cm, gerando uma zona de transição no encontro do aterro, onde os recalques variam de 0 cm a 16 cm ao longo de um trecho de aproximadamente 40 m. Isso resulta em uma transição mais suave entre o apoio da ponte, que permanecerá praticamente estático, e o encontro do aterro reforçado. Esses resultados evidenciam a eficácia do uso das inclusões na distribuição proposta.

Para uma melhor apreciação dos resultados obtidos, a Figura 7 apresenta os gráficos de distância *versus* recalques para os cenários analisados. Neste gráfico, é possível definir de maneira mais clara a zona de transição, que se estende da distância zero até 40 m. Mesmo considerando que o recalque gerado pela construção fosse somado ao recalque devido ao colapso, o sistema de reforço demonstra grande eficiência, reduzindo o recalque máximo na interface de 42 cm para 9 cm, o que representa uma diminuição de 80%.

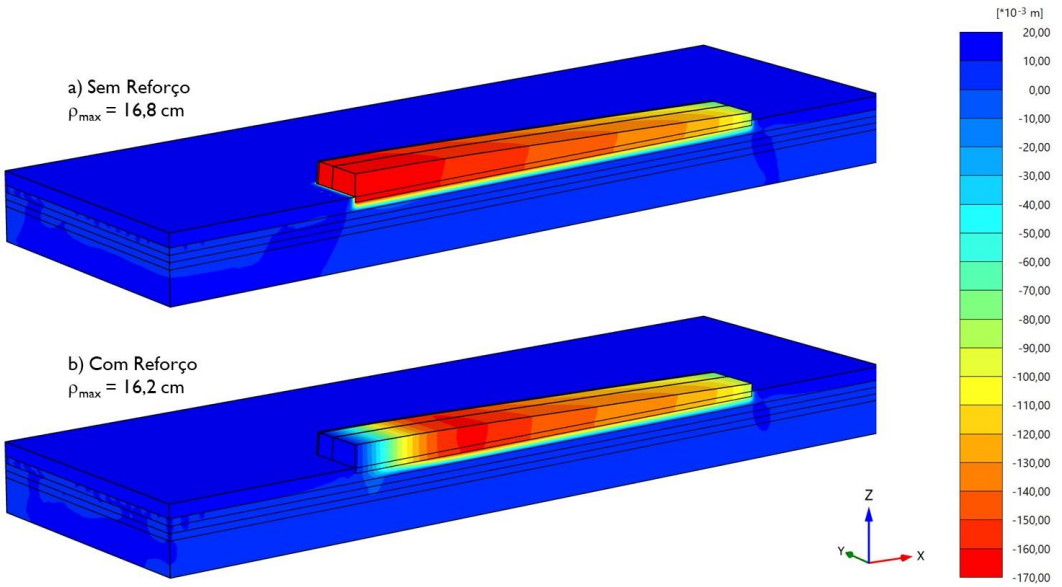


Figura 6. Deslocamentos verticais gerados na etapa de colapso da camada de argila arenosa porosa, a) sem e b) com inclusões rígidas.

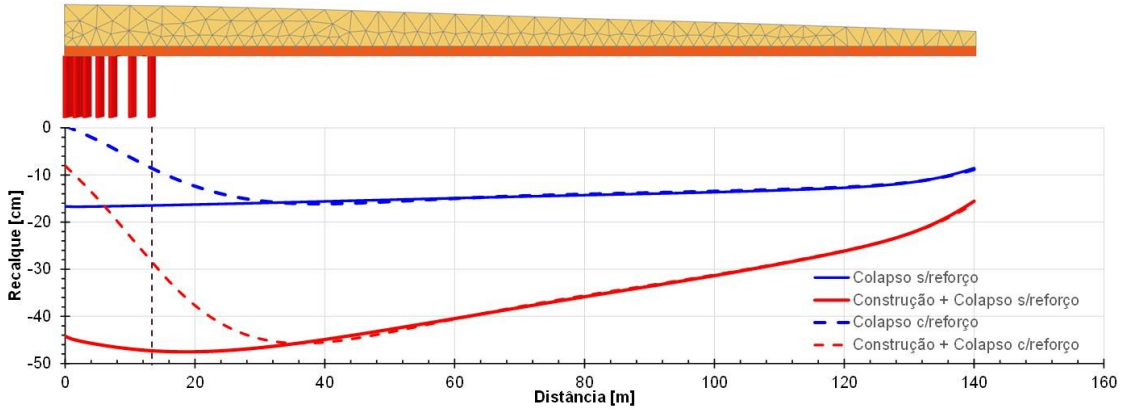


Figura 7. Perfil de recalques ao longo do aterro reforçado para os casos analisados.

5 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise detalhada do reforço das fundações dos muros de encontro do viaduto em Planaltina, DF, utilizando um modelo geotécnico tridimensional baseado no método dos elementos finitos. As principais conclusões são as seguintes:

→ Inclusões de solo-cimento de 70 cm mostraram resultados semelhantes aos de concreto de 50 cm, com a capacidade de carga do sistema assegurada pelo solo compactado do aterro.

→ Os recalques desenvolvidos durante a etapa construtiva serão ajustados automaticamente à medida que o aterro for elevado, assim que os nivelamentos topográficos forem realizados. Mesmo considerando que o recalque gerado pela construção fosse somado ao recalque devido ao colapso, o sistema de reforço demonstra grande eficiência, reduzindo o recalque máximo na interface de 42 cm para 9 cm, representando uma diminuição de 80%.

→ Os resultados da análise dos deslocamentos gerados pelo colapso da camada de argila arenosa porosa mostram a eficácia das inclusões rígidas. Os recalques máximos foram reduzidos, e se gerou uma transição mais suave entre o apoio da ponte e o aterro reforçado, de 0 cm a 16 cm ao longo de 40 m. Essa transição resulta em uma distribuição de cargas mais uniforme e minimiza o impacto do recalque do aterro na interface com a fundação da ponte.

→ Recomenda-se a instalação de placas de recalque na transição entre o solo não reforçado e o reforçado com inclusões, além da realização de monitoramentos periódicos após a conclusão da obra. Isso permitirá

avaliar o comportamento a longo prazo das inclusões e do solo circundante, especialmente em relação a possíveis variações de umidade e carga.

Em suma, o uso de inclusões rígidas como método de reforço se mostrou promissor, oferecendo uma solução técnica viável para os desafios geotécnicos apresentados na interseção estudada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a EMBRE Engenharia e Fundações, à Universidade de Brasília, a CAPES e ao CNPq pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2022). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: ABNT.

Alonso, E.E., Gens A., Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40(3): 405-430. https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405

Bentley (2024a) *Plaxis: Material Models Manual 3D*. Plaxis 3D, V. 2024.3

Bentley (2024b) *Plaxis: User Defined Soil Models (UDSM), Available Models*. Plaxis 3D, V. 2024.3

Buritica-Garcia, J.A., Rodríguez-Rebolledo, J.F., Mützenberg, D.V.S., Caicedo, B., Gitirana, G.F.N.Jr. (2021) Experimental investigation of a load-transfer material for foundations reinforced by rigid inclusions. *J Geotech Geoenviron Eng* 147:1–14. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002649

Camapum de Carvalho, J. (2015) *Solos não saturados no contexto geotécnico* / José Camapum de Carvalho ... [et.al.] orgs.. – São Paulo: ABMS, 2015. xxxvi, 759 p.: il. ISBN 9788567950037

Cintra, J.C.A. (1998) *Fundações em Solos Colapsíveis*. 1ed. São Carlos: EESC, USP. 106. p.

Cintra, J.C.A., Aoki, N. (2013) *Projeto de Fundações em Solos Colapsíveis*. São Carlos: EESC-USP. 99. p.

Rodríguez-Rebolledo, J.F., Pérez-León, R.F., Camapum de Carvalho, J. (2019a) Performance Evaluation of Rigid Inclusion Foundations in the Reduction of Settlements. *Soils and Rocks*, 42(3). https://doi.org/10.28927/sr.423265

Rodríguez-Rebolledo, J.F., Pérez-León, R.F., Camapum de Carvalho J. (2019b) Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*, 42(1). https://doi.org/10.28927/SR.421061

Rodríguez-Rebolledo, J.F., Santiago, I., Bernardes, H., Mendes, T. (2022) Performance evaluation of rigid inclusions for settlement control of grain silos in tropical soils. *Soils and Rocks*, 45(4). https://doi.org/10.28927/sr.2022.004822

Santos-Neta, B.G., Rodríguez-Rebolledo, J.F., Araujo, G.L., Silva, S.O. e Cordão-Neto, M.P. (2025) Physical and numerical investigation of rigid inclusions in collapsible soils. *Acta Geotechnica*. https://doi.org/10.1007/s11440-025-02808-3

Schanz, T., Vermeer, A., Bonnier, P. (1999). The hardening soil model: formulation and verification. In: Proc. Int. Symp. beyond 2000 Comput. Geotech. 10 years Plaxis, Amsterdam, Netherlands, 281 p.

Silva, C.M., Camapum de Carvalho, J., Aquino, F.R. (2016) Estacas Escavadas Assentes na Argila Porosa Colapsível de Brasília, Caso de Obra. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte.