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/COBRAMSEG2026.4/4

Análise Acoplada Hidromecânica de Aterro Sobre Solo Mole: Estudo de Caso no Cabo de Santo Agostinho/PE

Thamirys Limeira Torres
Engenheira Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, thamirys.l.torres@gmail.com

Andréa Batista de Farias Dias
Professora Adjunto, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, abfd1@poli.br

Airton Ruan Alexandre da Silva
Engenheiro Civil, Universidade de Pernambuco, Olinda, Brasil, ruanaintonabc@gmail.com

João Batista Pereira Alves de Almeida
Engenheiro Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, jbatistapaa2@gmail.com

Pedro Eugênio Silva de Oliveira
Professor Adjunto, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, pedro.oliveira@poli.br

RESUMO: Este estudo analisa o comportamento hidromecânico de um aterro rodoviário executado sobre solo mole em um trecho da Rodovia PE-09, nas proximidades do Complexo de Suape, com foco nos mecanismos de adensamento e na evolução das pressões neutras. A região é marcada por depósitos siltoso-argilosos de baixa resistência, elevada compressibilidade e permeabilidade reduzida, que induzem recalques consideráveis e deformações laterais ao longo do tempo. A investigação foi desenvolvida por meio de modelagem numérica bidimensional no software RS2, fundamentada no Método dos Elementos Finitos (MEF), contemplando a simulação de etapas construtivas, aplicação incremental de sobrecargas e a calibração com parâmetros geotécnicos obtidos em sondagens e ensaios de caracterização e adensamento. Os resultados indicaram recalques verticais de 9,1 cm no carregamento inicial e 24,2 cm após um ano, deslocamentos horizontais máximos de 3,3 cm e significativa dissipação temporal das poropressões, evidenciando a predominância do adensamento primário, com participação da deformação viscosa secundária. Observou-se também dissipação progressiva das poropressões ao longo do tempo, evidenciando a predominância do adensamento primário, complementado pela contribuição da deformação viscosa secundária. Inicialmente, as pressões neutras suportam parcela significativa das tensões totais, mas sua redução gradual mediante drenagem promove o aumento das tensões efetivas e a consequente deformação do maciço. A análise conjunta dos deslocamentos e da evolução das poropressões reforça a relevância do acoplamento hidromecânico para a previsão de recalques e para o monitoramento do desempenho de aterros sobre solos moles, destacando a necessidade de avaliação detalhada das etapas construtivas e das condições de drenagem para garantir a segurança e a durabilidade da infraestrutura implantada.

PALAVRAS-CHAVE: Adensamento, Solo Mole, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT: This study analyzes the hydromechanical behavior of a road embankment constructed on soft soil in a section of the PE-09 Highway, near the Suape Industrial Complex, with a focus on consolidation mechanisms and the evolution of pore water pressures. The region is characterized by silty-clay deposits of low strength, high compressibility, and reduced permeability, which induce significant settlements and lateral deformations over time. The investigation was conducted through two-dimensional numerical modeling using the RS2 software, based on the Finite Element Method (FEM), incorporating the simulation of construction stages, incremental surcharge application, and calibration with geotechnical parameters obtained from site investigations, characterization, and consolidation tests. The results indicated vertical settlements of 9.1 cm at

initial loading and 24.2 cm after one year, with maximum horizontal displacements of 3.3 cm. A progressive dissipation of pore pressures was observed over time, confirming the predominance of primary consolidation, complemented by the contribution of secondary viscous deformation. Initially, pore pressures support a significant portion of the total stresses; however, their gradual reduction due to drainage promotes an increase in effective stresses and the subsequent deformation of the soil mass. The joint analysis of displacements and pore pressure evolution underscores the relevance of hydromechanical coupling for predicting settlements and monitoring the performance of embankments on soft soils, highlighting the necessity of a detailed evaluation of construction stages and drainage conditions to ensure the safety and durability of the implemented infrastructure.

KEYWORDS: Consolidation, Soft Soil, Finite Element Method (FEM).

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico exponencial e a consequente expansão da infraestrutura impuseram à engenharia civil a necessidade de ocupar territórios anteriormente considerados marginais do ponto de vista geotécnico. Segundo Costa (2021), o aumento da ocupação global, com grandes construções e redes viárias, trouxe o desafio de realizar obras sobre solos moles, uma questão relevante para a engenharia. A escassez de áreas com solos mecanicamente competentes, especialmente em regiões litorâneas e de planícies costeiras, transformou a construção sobre solos moles de uma exceção técnica em uma necessidade para a viabilidade de redes rodoviárias e ferroviárias (Anjos, 2018).

De acordo com a norma DNIT 381/2022, solos moles são solos sedimentares finos, de alta plasticidade, alta compressibilidade e baixa resistência e permeabilidade, cuja fração argilosa confere características de solo coesivo e compressível. Essas características fazem com que esses solos apresentem uma capacidade limitada de suporte, sendo altamente suscetíveis a deformações quando submetidos a cargas adicionais, como os de aterros ou fundações. Sua alta compressibilidade significa que, ao longo do tempo, esses solos sofrem recalques significativos devido ao processo de adensamento, o que impacta a estabilidade de estruturas construídas sobre eles.

Nesse cenário, o projeto de construção de um aterro sobre solo mole deve garantir um fator de segurança adequado contra rupturas do solo de fundação durante e após a construção, assegurar que os deslocamentos totais ou diferenciais sejam compatíveis com o tipo de obra e evitar danos a estruturas adjacentes ou enterradas (Bello, 2004). O comportamento desses solos é governado pelo processo de adensamento, no qual a aplicação de sobrecargas gera excesso de poropressão que se dissipa ao longo do tempo, promovendo a transferência de tensões para o esqueleto sólido do solo. Nesse contexto, Norberto (2025) destaca que o comportamento do solo é fortemente influenciado pela interação entre os processos hidráulicos e mecânicos, exigindo uma análise hidromecânica acoplada. Essa abordagem torna-se essencial para a previsão do desempenho dessas obras, uma vez que considera a interdependência entre o fluxo de água e as deformações do maciço.

Este estudo utiliza o software RS2, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para analisar, de forma realista e bidimensional, o comportamento de um aterro sobre solo mole na Rodovia PE-09, onde manifestações patológicas comprometeram a estrutura de contenção do aterro. O objetivo central é investigar os deslocamentos nos aterros de acesso, aproveitando a robustez da modelagem numérica para simular condições de contorno complexas e etapas construtivas incrementais. A escolha do método justifica-se pela capacidade de acoplamento hidromecânico, permitindo avaliar recalques e a evolução das poropressões com precisão superior aos métodos analíticos tradicionais, garantindo uma compreensão detalhada da interação solo-estrutura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

Este artigo apresenta o estudo de caso de dois aterros rodoviários de acesso a uma ponte localizada na rodovia PE-09, no município do Cabo de Santo Agostinho, nas proximidades de um complexo portuário, onde foram identificadas patologias no encontro da ponte associadas a recalques excessivos. A estrutura é constituída por dois aterros com aproximadamente oito metros de altura, executados com contenção em terra armada, como mostra a figura 1, implantados sobre um subsolo caracterizado por uma camada de solo mole com cerca de 13 metros de espessura.



Figura 1. Viaduto analisado.

2.2 Características da Modelagem

Os parâmetros utilizados na modelagem no software foram definidos com base na caracterização geotécnica do subsolo e dos materiais constituintes do aterro que foi realizada com base em investigações geotécnicas, ensaios laboratoriais e dados da literatura, extraídos dos estudos de Bello (2011), Dias (2018) e Souza Neto (2023), sendo posteriormente realizadas algumas adaptações para adequação às condições analisadas no presente estudo.

O aterro, constituído por argila arenosa, apresenta peso específico de 18 kN/m³, coeficiente de Poisson de 0,33, porosidade de 0,50, coesão de 30 kPa, ângulo de atrito crítico de 32° e módulo de elasticidade de 23.500 kPa. A camada de argila siltosa média possui peso específico de 20 kN/m³, coeficiente de Poisson de 0,30, porosidade de 0,72, coesão de 8 kPa, ângulo de atrito de 28° e módulo de elasticidade de 25.000 kPa, enquanto a argila siltosa mole apresenta peso específico de 16 kN/m³, coeficiente de Poisson de 0,30, porosidade de 0,72, coesão de 8 kPa, ângulo de atrito de 28° e módulo de elasticidade de 20.000 kPa.

A camada de argila orgânica é caracterizada por peso específico de 13 kN/m³, coeficiente de Poisson de 0,30, porosidade de 0,83, coesão de 8 kPa, ângulo de atrito de 18° e módulo de elasticidade de 20.000 kPa. A areia média apresenta peso específico de 16 kN/m³, coeficiente de Poisson de 0,30, porosidade de 0,50, coesão de 10 kPa, ângulo de atrito de 35° e módulo de elasticidade de 20.000 kPa, enquanto a argila siltosa cinza possui peso específico de 20 kN/m³, coeficiente de Poisson de 0,30, porosidade de 0,72, coesão de 8 kPa, ângulo de atrito de 28° e módulo de elasticidade de 20.000 kPa.

Com base nesses parâmetros, foi desenvolvida a modelagem numérica por meio do software RS2, utilizando o Método dos Elementos Finitos. A análise foi realizada de forma acoplada, considerando simultaneamente os processos de deformação e fluxo transiente, fundamentados na teoria do adensamento de Biot. Para a representação do comportamento mecânico das camadas de solo, adotou-se o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, em função de sua aplicabilidade, simplicidade e compatibilidade com os dados disponíveis.

A simulação contemplou as diferentes etapas construtivas da obra, iniciando-se pela condição natural do terreno, seguida da aplicação da sobrecarga e da execução do aterro em camadas. Essa abordagem permitiu a avaliação da dissipação das poropressões e da evolução dos recalques ao longo do tempo, possibilitando a análise do comportamento hidromecânico do sistema e sua relação com as patologias observadas na estrutura.

A simulação numérica foi conduzida considerando as diferentes etapas construtivas da obra, de forma a representar adequadamente a evolução das cargas e das condições do terreno ao longo do tempo. O estágio inicial correspondeu à condição natural do terreno de fundação, no primeiro dia de análise. Em seguida, no segundo dia, foi considerada a execução da fundação.

A construção do aterro foi simulada de forma progressiva, a partir do terceiro dia, com a aplicação sucessiva de camadas de 1,0 m de altura, iniciando-se com o aterro de 1,0 m no terceiro dia e prosseguindo até a execução da camada de 8,0 m no décimo dia. Dessa forma, foram modeladas as etapas correspondentes aos aterros de 2,0 m, 3,0 m, 4,0 m, 5,0 m, 6,0 m, 7,0 m e 8,0 m, respectivamente.

Após a conclusão da construção, foi considerado um período de pós-obra para avaliação do comportamento do maciço. O primeiro estágio pós-obra correspondeu ao décimo primeiro dia, representando um dia após o término da execução, enquanto o último estágio foi definido aos 365 dias, correspondente a um ano após a conclusão da obra. Esses estágios permitiram a análise da dissipação das poropressões e da evolução dos recalques ao longo do tempo.

3 RESULTADOS

3.1 Deslocamento Total

A Figura 2 mostra os deslocamentos totais estão concentrados ao redor das estacas, com um recalque máximo de 9,1 cm próximo à superfície do terreno. Na Figura 3, após a construção do aterro, o recalque atingiu 13 cm. Um ano depois, o recalque totalizou 24,2 cm, demonstrando a evolução dos assentamentos ao longo do tempo e a resposta do solo às cargas aplicadas (Figura 4).

Os deslocamentos totais, que envolvem movimentos verticais e horizontais, estão intimamente relacionados ao processo de adensamento do solo, que ocorre quando este é comprimido sob a ação de cargas aplicadas. Em solos moles, como as argilas, o adensamento resulta na expulsão de água dos poros e na redução do volume do solo, causando recalques verticais progressivos. Esse processo pode ser notado ao longo dos estágios apresentados anteriormente e as suas variações.

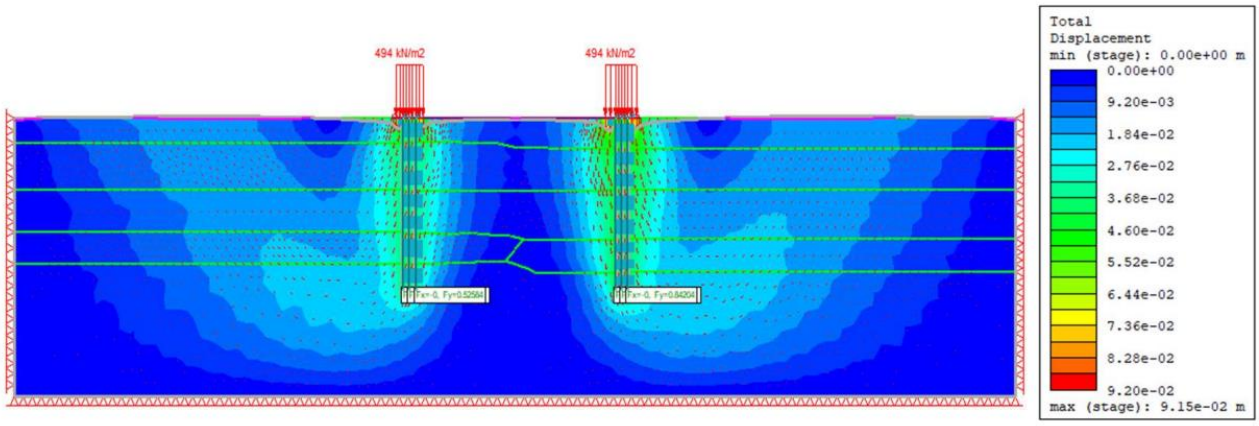


Figura 2. Deslocamento Total na Etapa de Carregamento da Fundação.

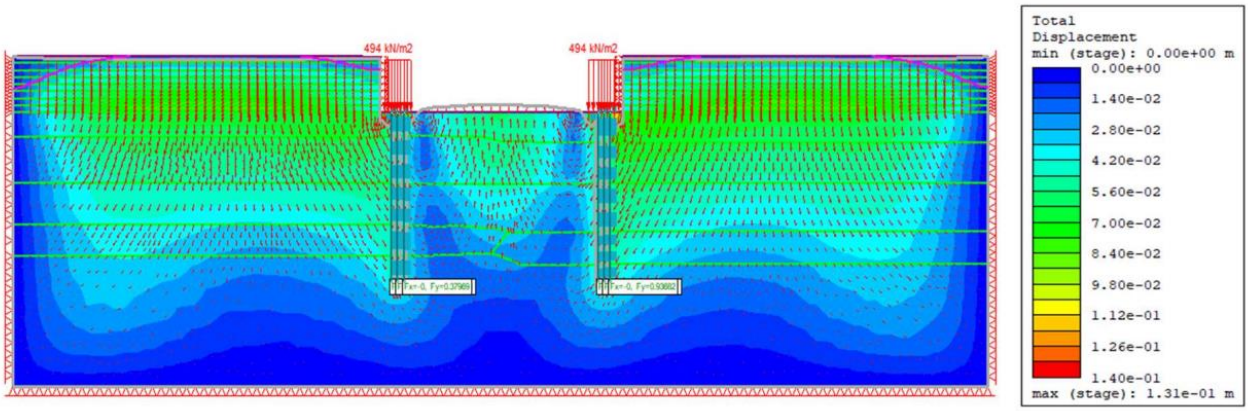


Figura 3. Deslocamento Total na Etapa de Término da Construção do Aterro.

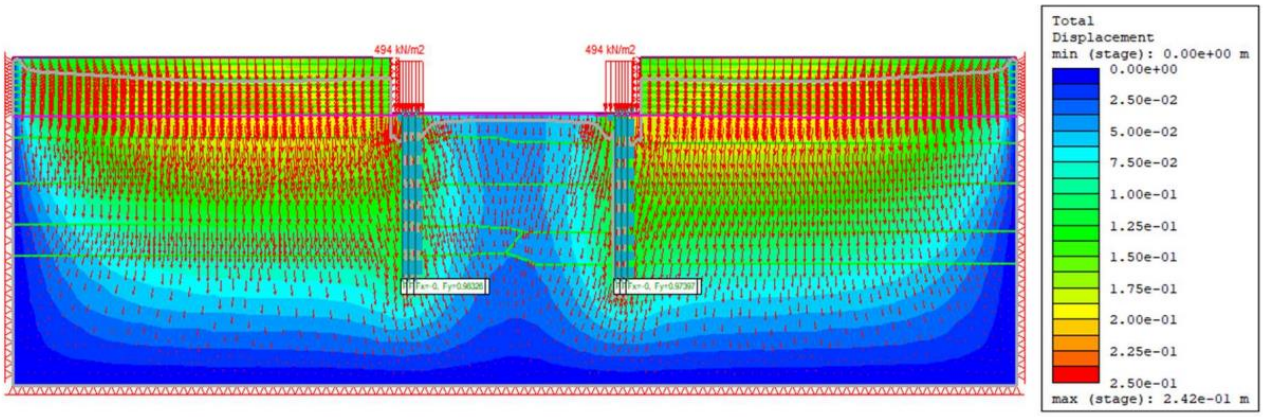


Figura 4. Deslocamento Total na Etapa de um ano pós obra.

3.2 Variação de Poropressão

A poropressão está relacionada à pressão exercida pelos fluidos nos poros do solo, sendo influenciada pelas tensões aplicadas e pelo processo de adensamento ao longo do tempo. Quando o solo é submetido a carregamentos, ocorre o rearranjo das partículas, o que aumenta as tensões internas e a poropressão, resultando em um processo de adensamento, onde o volume do solo diminui à medida que a água é drenada. O monitoramento dessas tensões e da poropressão é essencial para garantir a estabilidade da obra, nesse sentido as Figuras 5, 6 e 7, apresentam a evolução da poropressão ao longo das etapas da obra.

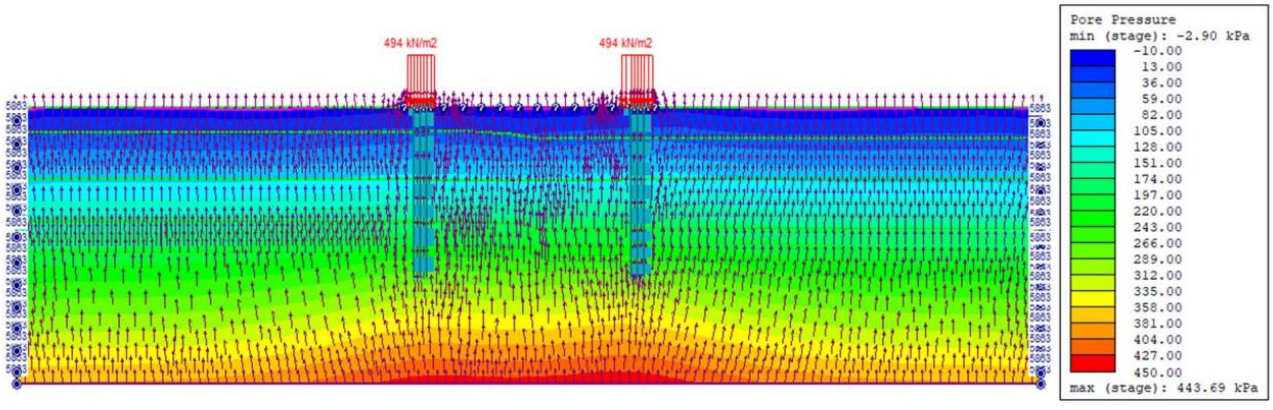


Figura 5. Poropressão da sobrecarga de fundação.

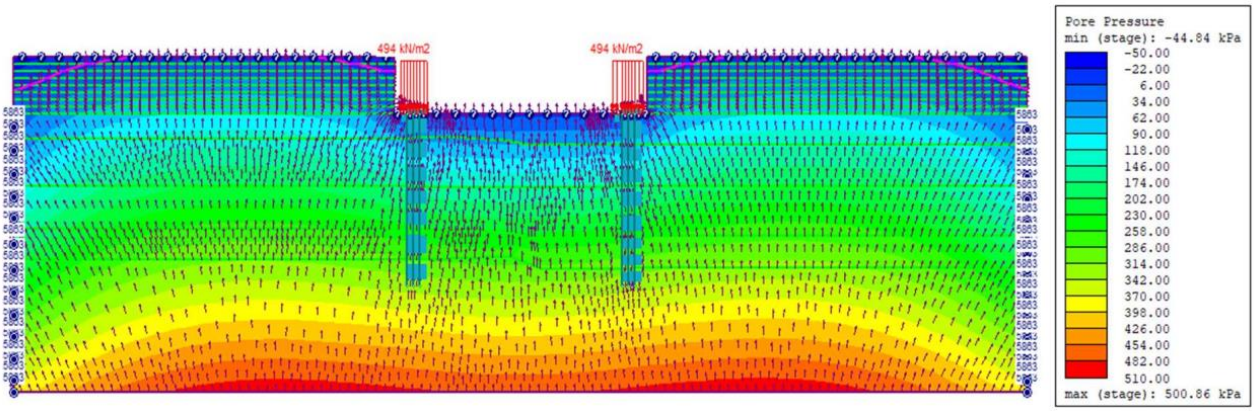


Figura 6. Poropressão após a construção do aterro.

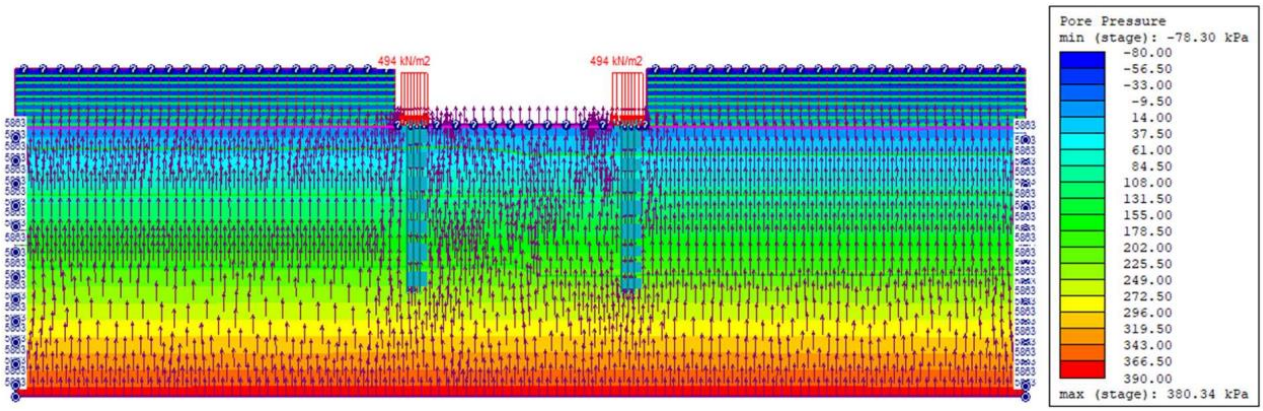


Figura 7. Poropressão após um ano do término da obra.

Durante o estágio de sobrecarga de fundação, a poropressão mínima registrada foi de -2,9 kPa e a máxima de 443,69 kPa. Na fase final de construção do aterro, os valores de poropressão variaram de -44,84 kPa a 500,86 kPa. Após um ano, as poropressões observadas oscilaram entre -78,30 kPa e 980,94 kPa. Esses resultados indicam um aumento progressivo da poropressão em função do incremento da sobrecarga do solo e do adensamento ocorrido ao longo do tempo.

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi possível observar os deslocamentos horizontais ao longo do carregamento das estacas e da elevação do aterro, com picos de até 3,3 cm, evidenciando a redistribuição de tensões e o potencial de instabilidade do terreno. A estabilização parcial dos deslocamentos após um ano ressalta a importância de um monitoramento contínuo e detalhado para prevenir patologias estruturais e garantir a segurança e a durabilidade das obras geotécnicas em solos moles.

Além disso, a análise dos deslocamentos totais em solos moles está diretamente ligada ao comportamento da poropressão, que aumenta inicialmente sob cargas aplicadas devido à compressão da água nos poros, suportando temporariamente as tensões. Com o tempo, a dissipação da poropressão pelo adensamento transfere as tensões para o solo sólido, estabilizando os deslocamentos. No entanto, a lentidão desse processo em solos moles resulta em recalques progressivos, como observado neste estudo, destacando a importância de monitorar a poropressão para garantir a segurança estrutural e o desempenho das obras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, W. L. S. *Análise de comportamento de aterro sobre solos moles - Caso do aterro rodoviário da BR-101 Goiana/PE*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BELLO, M. I. M. C. V. *Estudo de ruptura em aterros sobre solos moles aterro do galpão localizado na BR-101 - PE*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

COSTA, M. M. C. *Modelação de fundações profundas sob solicitação horizontal devida a deslocamento do terreno*. 2021. Tese (Mestrado em Mecânica dos solos e Engenharia geotécnica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 381/2022 - PRO: *Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias – procedimento*. Brasília: DNIT, 2022.

DIAS, A. B. F. *Análise Acoplada Hidromecânica da Construção de Aterro Sobre Solo Mole em Ipojuca-PE*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

NOBERTO, A. S. *Análise acoplada hidromecânica da construção de um aterro sobre solo mole na região metropolitana do Recife (PE)*. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2025.

SOUZA NETO, D. P. de. *Avaliação do comportamento de aterro construído sobre solo mole: monitoramento geotécnico e modelagem numérica bidimensional e tridimensional*. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.