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/COBRAMSEG2026.5/98

Tratamento de solos moles com colunas de brita – análise comparativa de dimensionamento e instrumentação na BR-493/RJ

Lucas de Araujo Estanqueiro
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.estanqueiro@agnet.com.br

Lucas Ribeiro Silva
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, lucas.silva@agnet.com.br

Marco Aurelio Abreu Peixoto da Silva
Engenheiro Civil, M.Sc., CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, marco.peixoto@agnet.com.br

Matheus Bernini Cecere
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, matheus.bernini@agnet.com.br

Pedro Augusto Silva Oliveira
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia, São Paulo, Brasil, pedro.soliveira@agnet.com.br

Beatriz Pozzebon
Engenheira Civil Geotécnica, EcoRodovias, São Paulo, Brasil, beatriz.pozzebon@ecorodovias.com.br

Gabriel Nogueira Rodrigues
Engenheiro Civil Geotécnico, Concremat S.A., Rio de Janeiro, Brasil, t_gabriel.rodrigues@ecorodovias.com.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma análise comparativa entre duas metodologias de dimensionamento de colunas de brita para fundação de aterro em uma região de depósito sedimentar flúvio-marinho, na região de Itaboraí, no Estado do Rio de Janeiro. Além da comparação dos recalques esperados pelo Método de Priebe e modelagem numérica, a partir de elementos finitos, foram instalados também dispositivos de instrumentação para monitoramento do adensamento da camada de argila mole durante e após a execução do aterro para tronco rodoviário. Além da comparação do dimensionamento das colunas de brita pelos dois métodos, e a previsão de recalque em cada um, o trabalho buscou retroanalisar os parâmetros adotados para este dimensionamento, a partir dos recalques medidos através de mini-prismas topográficos de alta precisão instalados no muro assente sobre a camada mole. A instrumentação da obra permitiu comparar os recalques previstos com os dados de campo, dando segurança para a liberação de tráfego na via, após a observação da estabilização destes recalques.

PALAVRAS-CHAVE: argilas moles, colunas de brita, adensamento, instrumentação, fundação.

ABSTRACT: The present study presents a comparative analysis between two design methodologies for stone columns used in embankment foundation over a fluvio-marine sedimentary deposit in the Itaboraí region, State of Rio de Janeiro. In addition to the comparison of the expected settlements obtained by the Priebe Method and numerical modeling based on the finite element method, instrumentation devices were also installed to monitor the consolidation of the soft clay layer during and after the construction of the embankment for the roadway. Beyond the comparison of the stone column design by both methods and the settlement predictions provided by each, the study aimed to back-analyze the parameters adopted in the design, based on the settlements measured through high-precision topographic mini-prisms installed on the retaining wall founded on the soft layer. The instrumentation of the project allowed observing the stabilization of the settlements, enabling the release of the roadway embankment for vehicle traffic.

KEYWORDS: soft clays, stone columns, consolidation, instrumentation, foundation

1 INTRODUÇÃO

O objeto de estudo do presente trabalho trata-se de uma obra rodoviária localizada na região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro, mais precisamente no Município de Itaboraí, margem da Baía de Guanabara. O empreendimento tem por objetivo ampliar a capacidade de tráfego da rodovia, que recebe um grande número de transportes logísticos durante todo o dia. Para além da questão logística, as melhorias irão conferir maior segurança viária não só para os usuários da rodovia, como para os moradores dos centros urbanos à margem de toda a extensão da estrada.

Neste sentido de ampliação de capacidade de tráfego, foram projetados 05 (cinco) novos viadutos com passagens inferiores, constituídos de aterro em solo reforçado assentes sobre uma fundação de coluna de brita em camada de argila muito mole – que será abordada com maior detalhe no capítulo seguinte.

O objetivo do trabalho é analisar um destes cinco viadutos em solo reforçado sobre colunas de brita, com relação à previsão de recalques pelo Método de Priebe e Método de Elementos Finitos, e comparar com os dados de campo a partir de instrumentação específica.

Cabe ressaltar que, a obra encontra-se em andamento concomitante com a elaboração deste trabalho, o que permite maior sensibilidade nas análises de escala real, com os dados da instrumentação. Na Figuta 1, é possível observar a concepção do viaduto em solo reforçado assente sobre as colunas de brita, durante a fase de construção:



Figura 1. Execução do aterro reforçado.

2 ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

O viaduto em aterro reforçado, objeto deste trabalho, está localizado no trecho inicial da rodovia em questão, e apresenta cobertura sedimentar irregular, entremeada por sedimentos flúvio marinhos e flúvio-lagunares, associada à Formação Macacu, parte esta, integrante da Bacia de Macacu. Este preenchimento data do Paleogeno – denominado terciário – e é formado por sedimentos clásticos continentais associados a sistemas deposicionais fluviais entrelelaçados (depósitos esses compostos por sedimentos muito finos e ricos em matéria orgânica, de baixa consistência), além de leques aluviais.

Este cenário confere ao sub-solo da região de implantação do viaduto uma baixa capacidade de suporte, contemplando camadas de argila mole e muito mole, com resistência à penetração (N_{SPT}) iguais e/ou inferiores

a 01 golpe, com espessuras que variam de 6,0 a 12,0 metros, conforme pode-se observar no perfil geológico-geotécnico da Figura 2:

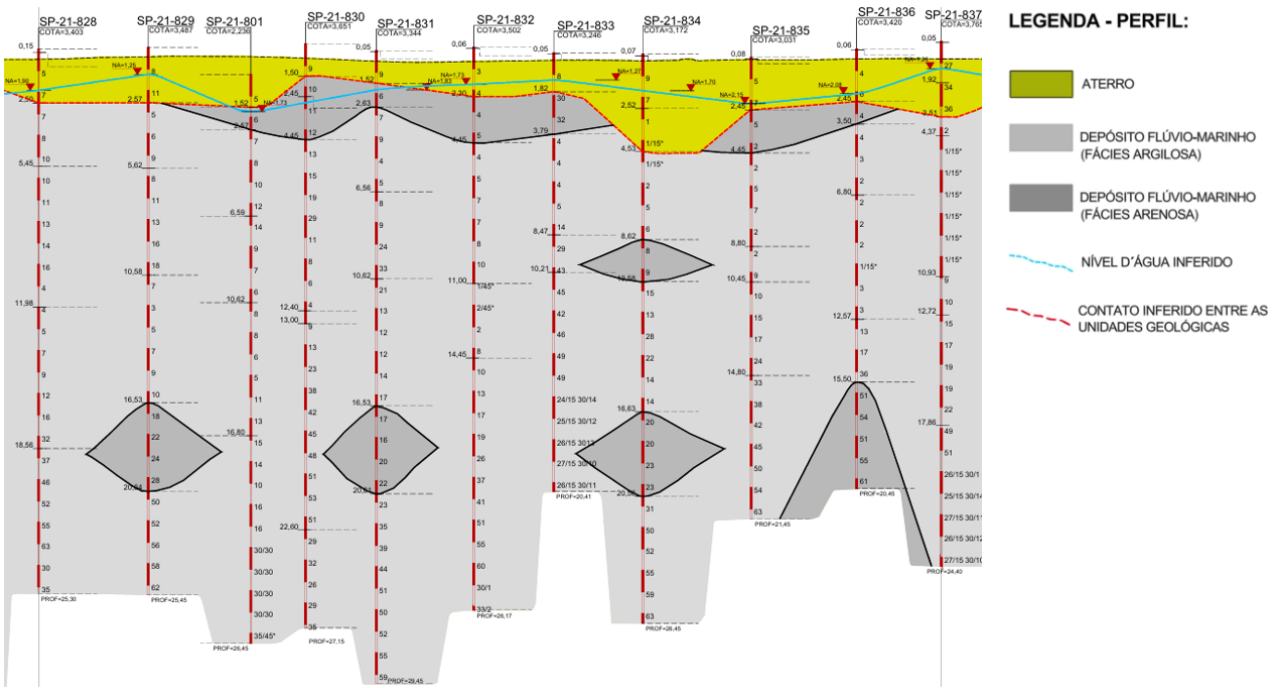


Figura 2. Perfil geotécnico da região do viaduto objeto deste estudo.

O trecho previsto para tratamento de coluna de brita está compreendido entre a seção 6+240 até a seção 6+575, onde predominam estes sedimentos com menor resistência, conforme supracitado. As seções de análise dos recalques estão compreendidas neste trecho.

3 MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

3.1 Método de Priebe

O método proposto por Priebe (1995), amplamente empregado em projetos de melhoramento de solos moles por vibrossubstituição, fundamenta-se no conceito de célula unitária, admitindo que a aplicação das colunas promove uma redistribuição de tensões no maciço, resultando na redução dos recalques totais do sistema solo-aterro. No presente estudo, adotou-se um arranjo de colunas em malha quadrangular, com diâmetro nominal de 0,80 m e espaçamento (s) de 2,75 m entre eixos, definidos a partir de critérios geométricos e de capacidade de suporte do solo mole subjacente. O material das colunas foi considerado granular, com ângulo de atrito interno igual a 37,5°, compatível com a brita graduada utilizada. O coeficiente de adensamento horizontal ch (equivalente ao cv, coeficiente de adensamento vertical) considerado foi de $6*10^{-8}$m²/s e a razão de sobreadensamento (RSA ou OCR) foi de 1,6.

O método considera os seguintes dados geométricos, baseados no conceito de célula unitária equivalente:

$$d_e = 1{,}13 * s \qquad (1)$$

$$A_c = \pi * \frac{d^2}{4} \qquad (2)$$

$$A = \pi * \frac{{d_e}^2}{4} \qquad (3)$$

$$a_c = A_c/A \quad (4)$$

Onde d_e é o diâmetro equivalente da célula, A_c é a área da coluna, A é área total da célula, a_c é a razão de substituição.

A fim de avaliar os recalques, Priebe (1995) propôs um método que considera o ângulo de atrito do material da coluna (φ_c), que neste caso será de 37,5°, e da razão de substituição (a_c) para a obtenção do fator de redução de recalques (β).

$$K_{ac} = tan^2\left(45° - \frac{\varphi_c}{2}\right) \quad (5)$$

$$\beta = 1 + a_c * \left[\frac{(5-a_c)}{[4K_{ac}(1-a_c)]} - 1\right] \quad (6)$$

A partir do fator β é possível estimar o recalque do solo tratado com colunas de brita (Δh_C) com base na estimativa de recalque por adensamento do solo não tratado (Δh).

$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta h_C} \quad (7)$$

Considerando-se o Δh o adensamento primário na camada não tratada, tem-se:

$$\Delta h_C = \frac{1}{\beta} * \frac{h}{(1+e_0)} * \left[C_r * log\left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}}\right) + C_c * log\left(\frac{\sigma'_{v0}+\gamma*(h_a-\Delta h)+(\gamma-\gamma_w)*\Delta h}{\sigma'_{vm}}\right)\right] \quad (8)$$

A estimativa do tempo de estabilização dos recalques para o cenário com o melhoramento do solo com colunas de brita é baseado na Teoria de Barron (1948). O amolgamento da argila ao redor das colunas de brita foi considerado em uma redução de diâmetro de 20%.

$$d_w = 0{,}8 * d_c \quad (9)$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} = \frac{1{,}13 * s}{d_w} \quad (10)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} * ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \quad (11)$$

$$t = -\frac{F(n)}{8} * {d_e}^2 * \frac{ln(1-Uh)}{c_h} \quad (12)$$

Em que $d_w[m]$ é o diâmetro efetivo da coluna após amolgamento, s[m] é o espaçamento entre colunas, F(n) é a função de densidade de drenos, t[s] é o tempo de estabilização dos recalques, $c_h[m^2/s]$ é o coeficiente de adensamento horizontal e U_h[%] = grau de adensamento devido ao fluxo radial.

A aplicação do método analítico de Priebe resultou, inicialmente, na estimativa do recalque do aterro sobre o solo mole na condição sem tratamento, cujo valor calculado foi da ordem de 36,4 cm. Com a introdução das colunas de brita, o fator de redução de recalques obtido foi aproximadamente β ≈ 1,30, conduzindo a um recalque estimado do sistema tratado da ordem de 28,1 cm.

No que se refere à evolução temporal dos recalques, o método indicou que cerca de 82% do adensamento primário total seria dissipado em aproximadamente 12 meses após o término da construção na condição com colunas de brita, considerando como critério de projeto um recalque residual máximo de 5 cm.

3.2 Modelagem Numérica

A análise numérica foi conduzida por meio de simulações utilizando o método dos elementos finitos através do software RS3, com o objetivo de representar de forma mais realista o comportamento do sistema

aterro - solo mole - colunas de brita. Essa abordagem permitiu considerar explicitamente a estratigrafia local, a heterogeneidade dos materiais e o processo construtivo do aterro.

O modelo numérico considerou a geometria representativa do trecho analisado, incluindo a camada de solo mole de origem flúvio-marinha, o aterro rodoviário e o reforço por colunas de brita. As colunas foram modeladas como inclusões granulares com propriedades mecânicas diferenciadas do solo natural, respeitando o diâmetro, espaçamento e profundidade adotados no projeto executivo. Para o solo mole, foram adotados parâmetros de deformabilidade e adensamento compatíveis com os resultados de ensaios edométricos, complementados por retroanálises e correlações com depósitos semelhantes da região.

Os módulos de elasticidade das camadas foram estabelecidos por correlação com Nspt, utilizando a proposição de Leão (2015):

$$E = 3000 * N_{spt}^{0,8} \tag{12}$$

Tabela 1. Parâmetros associados às camadas geotécnicas.

Camada	γn [kN/m³]	c' [kPa]	Φ' [°]	Nspt,méd	E [kN/m²]
Aterro 1	19,0	15,0	29,0	15	26.000
Aterro 2	16,0	12,0	25,0	10	18900
Argila mole	14,5	0,0	28,0	0	320 a 640
Aluvião	17,0	15,0	15,0	4	9000
Terciário	18,0	25,0	30,0	4 a 30	9000 a 45000

A modelagem tridimensional no RS3 representou a geometria do aterro com 4 m de altura, a camada superficial, a argila mole com cerca de 6 m de espessura e o embutimento das colunas aproximadamente 4 m no estrato mais resistente, resultando em comprimento total próximo de 12 m.

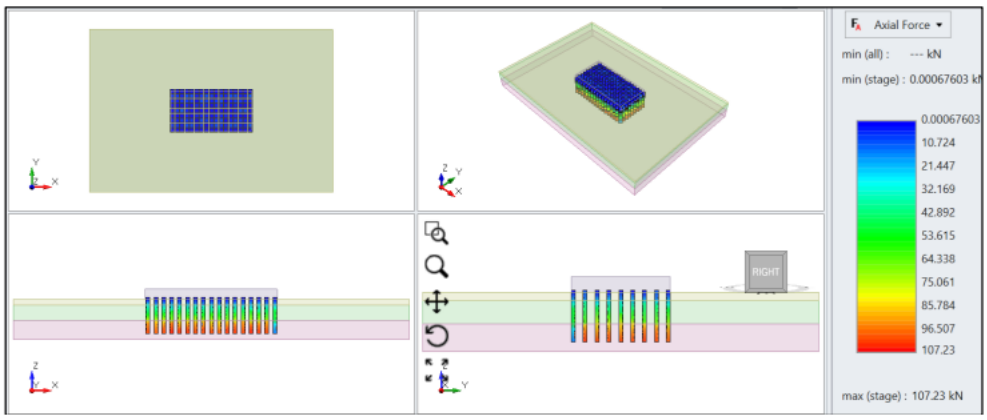


Figura 3. Modelagem tridimensional.

Os recalques foram avaliados considerando a dissipação de poropressão com acoplamento de fluxo e deformação, baseado na teoria do adensamento de Biot (1941), permitindo simular a dissipação das poro-pressões ao longo do tempo. Os resultados indicaram que, diferentemente do comportamento do solo não reforçado, cujo recalque evolui por períodos prolongados, o solo tratado apresenta rápida estabilização ainda durante a fase construtiva, característica típica desse tipo de solução. Observa-se, contudo, que os valores obtidos tendem a ser ligeiramente conservadores, uma vez que o carregamento foi aplicado de forma instantânea no modelo, enquanto em campo ele ocorre de maneira progressiva durante o alteamento do aterro.

A interpretação dos registros de poropressão dos ensaios CPTu evidenciou comportamento contrátil na argila mole e dilatante no substrato aluvionar subjacente, indicando que este último atua como meio drenante mais permeável. Dessa forma, na modelagem numérica e na interpretação hidráulica do problema, o adensamento foi considerado com duas faces drenantes, o que se refletiu na aceleração significativa da

dissipação dos recalques. As simulações indicaram que, após aproximadamente 3 meses, já teria ocorrido cerca de 92% do recalque total previsto, restando um recalque residual da ordem de 3 cm, compatível com o desempenho esperado para aterros sobre solos moles reforçados por colunas de brita.

A análise dos resultados também permitiu avaliar a redistribuição de tensões promovida pelas colunas. Verificou-se que a maior parcela do carregamento vertical é absorvida pelas colunas e transferida ao estrato mais competente, enquanto apenas uma fração reduzida é mobilizada na argila mole. Os contornos de deslocamentos verticais confirmam recalques máximos da ordem de 0,33 m para 12 meses.

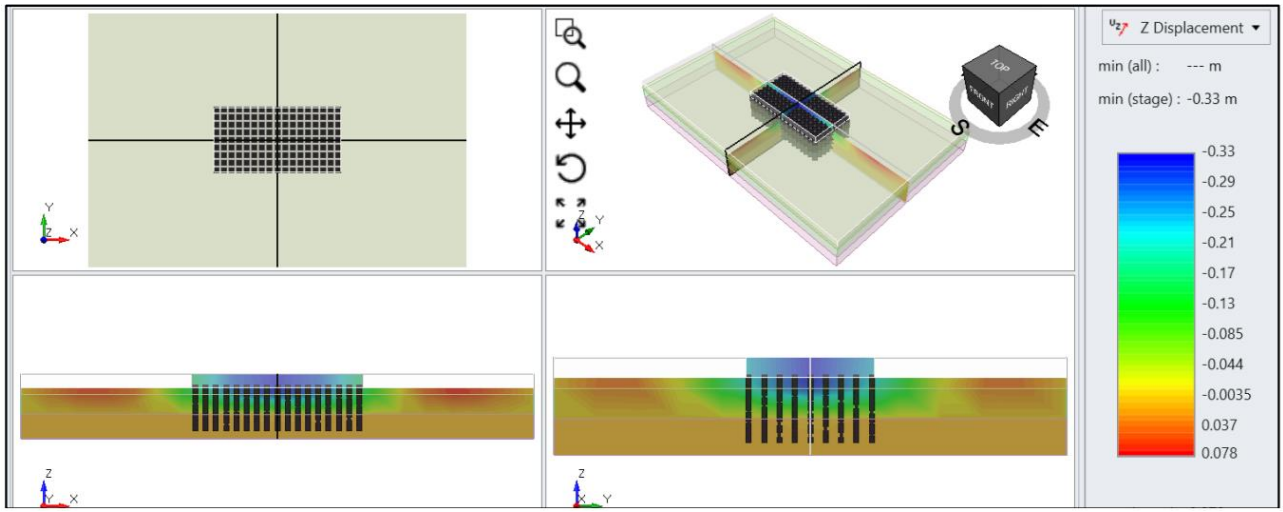


Figura 4. Resultado dos deslocamentos na modelagem tridimensional.

4 ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO E RESULTADOS

A concepção da instrumentação se deu a partir da interface entre projetista e executora, de forma que os instrumentos não limitassem ou interferissem na construção, e ao mesmo tempo, fornecessem dados seguros para a avaliação dos recalques. Desta forma, estabeleu-se a utilização de mini-prismas topográficos instalados na face das placas de concreto do muro de solo reforçado, de forma que, periodicamente fossem realizadas leituras destes dispositivos que, a partir de pontos georreferenciados indicassem a diferença de elevação, semana a semana, sendo possível calcular o recalque. Foram instalados mini-prismas em seções transversais a cada 50,0 m, de forma que, em cada seção transversal houvesse o controle dos recalques tanto do lado crescente, quanto do lado decrescente da rodovia, uma vez que o alteamento do aterro não foi uniforme nos dois lados, como poderá ser observado mais à frente nos gráficos de Alteamento VS Recalque.

O equipamento de topografia utilizado para realizar as leituras foi uma Estação Total do tipo Leica TS-09 Plus 1” R1000, com precisão de ±1,5mm + 2ppm. Dada a magnitude dos recalques esperados de até quatro dezenas de centímetros, o equipamento utilizado tem precisão suficiente para fornecer informações confiáveis acerca do dados obtidos.

Os gráficos apresentados abaixo, referem-se respectivamente às seções: 6+250, 6+300 e 6+350, onde se encontra a maior altura de aterro (aproximadamente 8,0m) assente sobre uma camadas de solo mole mais representativa. É possível observar que, nas três seções analisadas, o comportamento dos recalques, tanto do lado crescente, quanto do lado decrescente, evoluiu à medida que o aterro fora alteado, e após um tempo, demonstrou uma taxa de avanço dos recalques estabilizada.

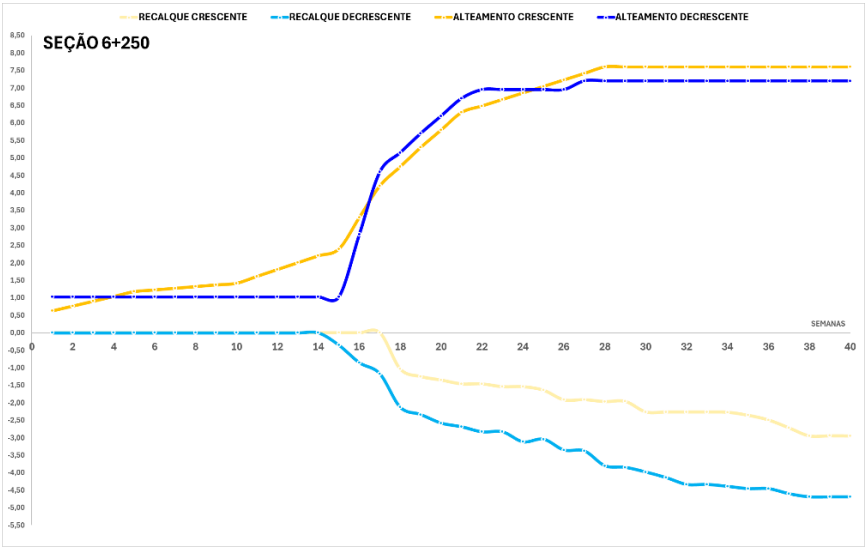


Figura 5. Seção 6+250 - Registros dos recalques medidos ao longo do tempo.

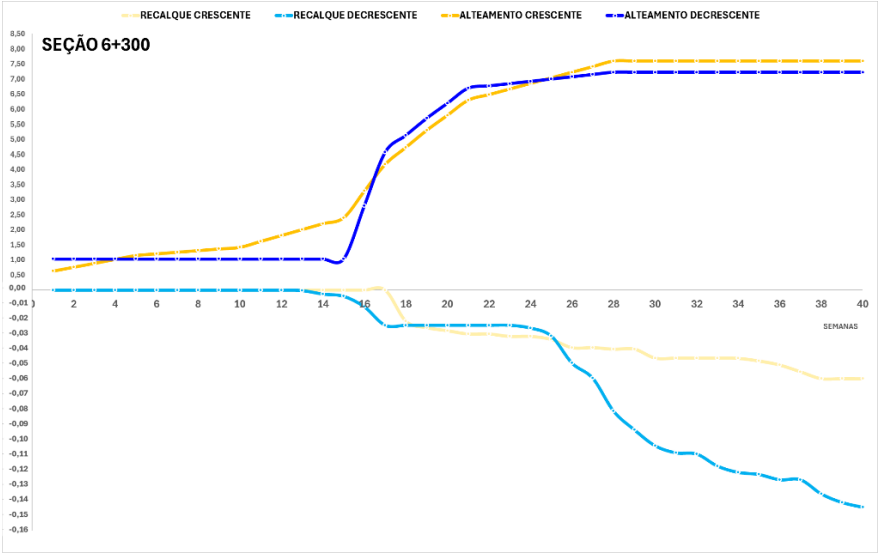


Figura 6. Seção 6+300 - Registros dos recalques medidos ao longo do tempo.

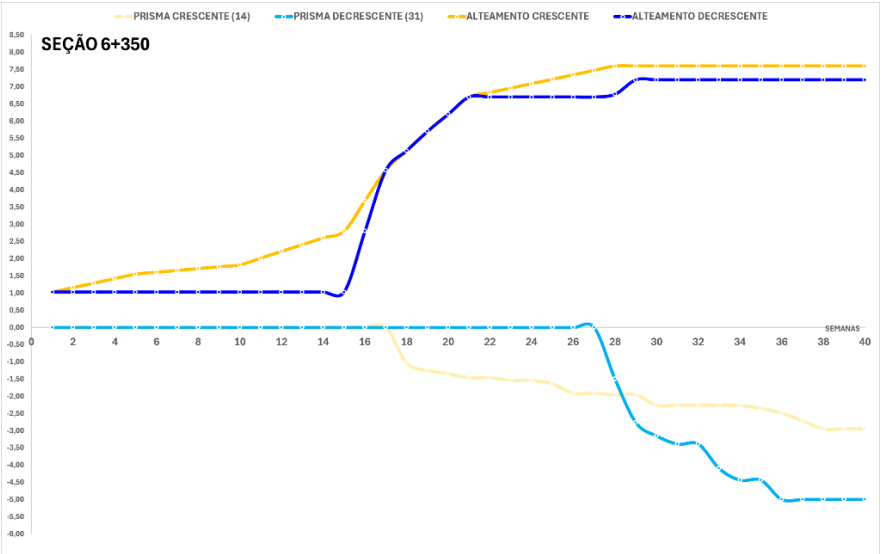


Figura 7. Seção 6+350 - Registros dos recalques medidos ao longo do tempo.

Na seção 6+250 a magnitude do recalque observado foi de aproximadamente 10,0cm com tendência de estabilização após 16 semanas de evolução.

Na seção 6+300 a magnitude do recalque observado foi de aproximadamente 15,0cm com tendência de estabilização após 12 semanas de evolução.

Na seção 6+350 a magnitude do recalque observado foi de aproximadamente 15,0cm com tendência de estabilização após 11 semanas de evolução.

5 CONCLUSÕES

Analisando os dois métodos de dimensionamento apresentados no presente trabalho, além dos dados de instrumentação coletados até a presente data, verifica-se que:

O Método de Priebe infere um recalque de magnitude da ordem de 28,1cm, com 5cm residuais admitidos e uma estabilização em 12 meses. Já o Método de Elementos Finitos prevê um recalque de magnitude de 33cm, com 3cm residuais admitidos e uma estabilização em 12 meses.

Os dados de campo mostram um recalque de magnitude de cerca de 15cm, com tendência de estabilização de 3 a 4 meses. Estas diferenças se justificam a partir de algumas premissas adotadas no método de dimensionamento, como por exemplo o carregamento único em apenas uma etapa, o que diverge da metologia executiva, onde o aterro vai sendo alteado lentamente. Além disso, não se considera no Método dos Elementos Finitos proposto neste trabalho, o melhoramento do solo com a inserção das colunas de brita. A situação em campo se mostra um pouco diferente, uma vez que, com a execução das colunas granulares, a camada de solo mole acaba virando um compósito de solo melhorado, o que por sua vez, faz com que a magnitude dos recalques esperados, seja menor do que a determinadas pelos métodos utilizados.

De maneira geral, os dois métodos se mostraram eficientes para a determinação dos recalques de aterro reforçado sobre fundação de aterro em solo mole com coluna de brita. A instrumentação de campo se mostrou eficiente no sentido de fornecer informações confiáveis para que a obra pudesse avançar com segurança, sem gerar danos às estruturas e perigo aos transeuntes da região.

Por fim, recomenda-se que, futuramente, sejam feitas análises comparativas entre estruturas similares, com camadas subjacentes também similares, em busca de uma convergência, tanto para a metodologia executiva, quanto para o método de dimensionamento. Sugere-se também que, em momento oportuno seja feita uma retroalimentação do projeto com dados de ensaio de campo realizados *a posteriori*, de forma que os parâmetros adotados para este projeto sejam revisitados em busca de uma análise comparativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aterro sobre solos moles: projeto e desempenho. Márcio de Souza S. Almeida & Maria Esther Soares Marques. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Lima, J. M. F., COSTA, M. S. T. da, RODRIGUES, Ary Paulo, SILA, Tiago Borges da, e ÁVILA, Robinson Alexandre (2020). *Tratamento de Solos Moles com Coluna de Brita – Um estudo de caso da Rodovia dos Tamoios*. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG). Campinas, São Paulo.

Lima, B. T. e Almeida, M. de S. (2016). *Recomendações para Análises e Projetos com Uso de Colunas de Brita em Solos Argilosos Muito Moles.* XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG). Belo Horizonte, Minas Gerais.

Souza, G. L. A., Pacheco, M., Souza, R. N. e Viana, E. A. (2016). *Projeto e controle de execução de reforço de solos moles utilizando colunas de material granular: experiência com a implantação de um grande empreendimento rodoviário*. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG). Belo Horizonte, Minas Gerais.

Leão, M. F. (2015). *Análise tensão deformação de uma barragem de concreto em solo residual preponderantemente anisotrópico*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.