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/COBRAMSEG2026.4/28

Aterros Executados sobre Solos Aluvionares Moles: Estudo de Caso no Centro de Treinamento RedBull Bragantino, Atibaia (SP)

André Querelli
Engenheiro Civil, M Sc., Diretor, **SYNCGEO**, Jundiaí, Brasil. andre.querelli@syncgeo.com.br

Felippe Facchinelli Lupo
Estagiário de Engenharia Civil, **SYNCGEO**, São Paulo, Brasil, felippelupo@gmail.com

Joana Rott
Engenheira Civil, Coordenadora de Projetos, **SYNCGEO**, Jundiaí, Brasil. joana.rott@syncgeo.com.br

RESUMO: A implantação de aterros sobre solos moles aluvionares representa um dos principais desafios da Mecânica dos Solos aplicada à engenharia geotécnica, em função da elevada compressibilidade e da baixa resistência ao cisalhamento desses materiais. Este artigo apresenta um estudo de caso referente à avaliação geotécnica definitiva dos aterros executados no Centro de Treinamento do Red Bull Bragantino, localizado em Atibaia (SP), em área de várzea do rio Atibaia. Foram realizadas extensas campanhas de investigação geotécnica, incluindo sondagens SPT, ensaios CPTu e ensaios laboratoriais em amostras indeformadas. A estimativa dos recalques por adensamento foi conduzida por meio de métodos analíticos baseados na teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi e por modelagens numéricas tridimensionais utilizando o software Settle3D.

PALAVRAS-CHAVE: solos moles; aterros; recalque por adensamento; análise probabilística.

ABSTRACT: The construction of embankments over soft alluvial soils is one of the main challenges in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering due to the high compressibility and low shear strength of these materials. This paper presents a case study related to the definitive geotechnical assessment of embankments built at the Red Bull Bragantino Training Center, located in Atibaia, São Paulo State, Brazil, within the floodplain of the Atibaia River. Extensive geotechnical investigation campaigns were carried out, including SPT borings, CPTu tests, and laboratory tests on undisturbed samples. Settlement estimates were performed using analytical methods based on Terzaghi's one-dimensional consolidation theory and three-dimensional numerical modeling with Settle3D software.

KEYWORDS: soft soils; embankments; consolidation settlement; slope stability; probabilistic analysis.

1 INTRODUÇÃO

A ocupação de áreas de várzea e planícies aluvionares para implantação de empreendimentos de médio e grande porte tem se intensificado no Brasil, exigindo soluções geotécnicas que garantam segurança estrutural e desempenho ao longo da vida útil das obras (Stahl e Moraes, 2018). Solos aluvionares moles, em geral saturados, caracterizam-se por elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento, o que pode resultar em recalques excessivos e instabilidades quando submetidos a carregamentos impostos por aterros (Dominoni, 2011).

O adensamento de solos moles é a redução gradual de volume de solos saturados, especialmente argilas de baixa permeabilidade, quando submetidos a carregamento. Inicialmente, o acréscimo de tensão é suportado pela água nos vazios (excesso de poropressão); com o tempo, ocorre sua dissipação e transferência da tensão para o esqueleto sólido, provocando recalque — processo denominado adensamento primário (TERZAGHI, 1943). Após essa etapa, pode ocorrer deformação adicional sob tensão constante, chamada adensamento secundário (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Conforme Pinto (2006), a Razão de Sobreadensamento (OCR) é a razão entre a tensão pré-adensamento máxima histórica do solo e a tensão efetiva atual atuante. Quando OCR = 1, o solo é classificado como normalmente adensado, indicando que a tensão atual é a máxima já sofrida pelo material durante sua história geológica. Quando OCR > 1, o solo é considerado sobreadensado, significando que já esteve submetido a tensões superiores às atuais - situação comum devido à erosão de camadas superficiais, rebaixamento do nível d'água ou remoção de carregamentos anteriores.

Além dessa equação, fazendo a diferença entre a pressão de pré-adensamento e pressão efetiva obtêm-se a margem de adensamento do solo que representa o acréscimo de tensão admissível antes que o solo entre na faixa de compressão virgem, na qual os recalques se tornam mais significativos (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

A margem de sobreadensamento ($\Delta\sigma'$) é calculada como a diferença entre a pressão de pré-adensamento máxima histórica (σ'_p) e a pressão efetiva vertical atual (σ'_v):

$$\Delta\sigma' = \sigma'_p - \sigma'_v \tag{1}$$

Esse valor representa o "estoque" de tensão que o solo pode absorver sem entrar na faixa de compressão primária, sendo diretamente relacionado ao OCR (Razão de Sobreadensamento) por $\Delta\sigma' = \sigma'_v \times (OCR - 1)$ (Terzaghi; Peck; Mesri, 1996).

Essa abordagem, embora menos convencional em análises geotécnicas rotineiras (Coduto, 2001), foi considerada para o desenvolvimento das análises de adensamento. Em projetos geotécnicos sobre solos moles aluvionares, a margem permite determinar cargas seguras para aterros ou fundações, evitando recalques excessivos (Mesri & Rokhsar, 1974).

Este artigo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados de uma avaliação geotécnica abrangente realizada para os aterros do Centro de Treinamento do Red Bull Bragantino, localizado em Atibaia (SP). O estudo baseia-se na aplicação da teoria da margem de adensamento e na modelagem progressiva e representativa dos recalques, considerando a caracterização geotécnica do subsolo e a estimativa dos recalques e do tempo de ocorrência por meio de métodos analíticos e numéricos.

Além disso, o trabalho apresenta resultados de monitoramento de campo, possibilitando a avaliação da magnitude dos recalques e de sua evolução ao longo do tempo. Esses dados foram utilizados para comparar os valores previstos pelos modelos analíticos e numéricos com os recalques efetivamente medidos em campo, permitindo verificar a aderência entre as estimativas teóricas e o comportamento real do solo, bem como avaliar a confiabilidade das metodologias adotadas.



Figura 1. Localização da área estudada.

2 DESCRIÇÕES DE ENGENHARIA

2.1 Descrição da obra

A obra trata-se do Centro de Treinamento do Red Bull Bragantino em Atibaia-SP. O empreendimento contempla a execução de aterros com aproximadamente 3,0 m de altura, destinados à implantação dos campos e estruturas associadas, em uma área com dimensões equivalentes a um campo de futebol.

2.2 Descrição do subsolo

O terreno se situa adjacente à várzea do Rio Atibaia, no município de Atibaia (SP), caracterizado por solos aluvionares quaternários de textura argilosa, saturados e de consistência mole, com presença ocasional de turfas (IPT, 2015; Brasil/CPRM, 2008). Geologicamente, insere-se no Cinturão Ribeira Central, Província Mantiqueira, abrangendo domínios Socorro-Guaxupé e Serra do Itaberaba–São Roque (Campanha; Ferronato, 1998; Hasui, 1990). Esses solos exibem elevada compressibilidade e baixa resistência, demandando controle rigoroso na execução de aterros para mitigar riscos de instabilidade e recalques excessivos (Ricci; Tominaga; Ferreira, 2012).

Foram executadas cinquenta e sete sondagens de simples reconhecimento com ensaio SPT, complementadas por ensaios in situ do tipo CPTu e por ensaios laboratoriais de caracterização, resistência e adensamento em amostras indeformadas. A partir da interpretação dos resultados, foram definidos cinco perfis geotécnicos representativos das condições do subsolo. Com isso, os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises foram obtidos principalmente a partir de ensaios de adensamento edométrico, com determinação dos índices de compressão (Cc), recompressão (Cr), tensões de pré-adensamento e coeficientes de adensamento (Cv), sendo complementados por interpretações dos ensaios CPTu.

Foram considerados representativos do solo descrito como Argila Siltosa, marrom claro e solo descrito como Silte Arenoso marrom amarelado, obtidos nos resultados dos ensaios triaxiais. Na Figura 2 pode-se observar que a imagem da esquerda mostra um Silte arenoso de coloração amarelada e marrom, já a direita é visto uma amostra de Argila siltosa de coloração marrom clara. De forma que foram observados perfis geotécnicos somente com a argila siltosa e outros perfis somente com a presença do silte argiloso, ainda ocorrendo em outros perfis, a presença dos dois materiais – porém sempre com a camada de argila siltosa sotoposta a camada de silte argiloso.

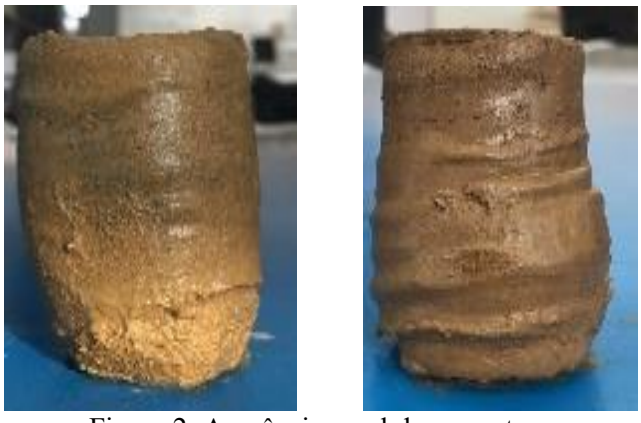


Figura 2. Aparência geral das amostras.

2.3 Simplificação do subsolo

Assim, os perfis geotécnicos adotados, consideraram a elevação da superfície natural na cota 743,5 m, com nível d'água na elevação 742,4 m (1,10 m abaixo da superfície) e com as camadas de solo compressíveis listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Perfis de Subsolo utilizados nas análises geotécnicas.

Camada de Solo	Perfil geotécnico				
	1	2	3	4	5
Argila siltosa, marrom amarelado (m)	2,1	3,4	2,3	1,7	0
Silte argiloso, cinza escuro (m)	0,0	0,0	1,0	2,4	3,5
Espessura compressível (m)	2,1	3,4	3,3	4,1	3,5

2.4 Sobre a instrumentação instalada

Para o controle dos recalques foram instaladas 11 placas ao longo do empreendimento, conforme visto na Figura 3.

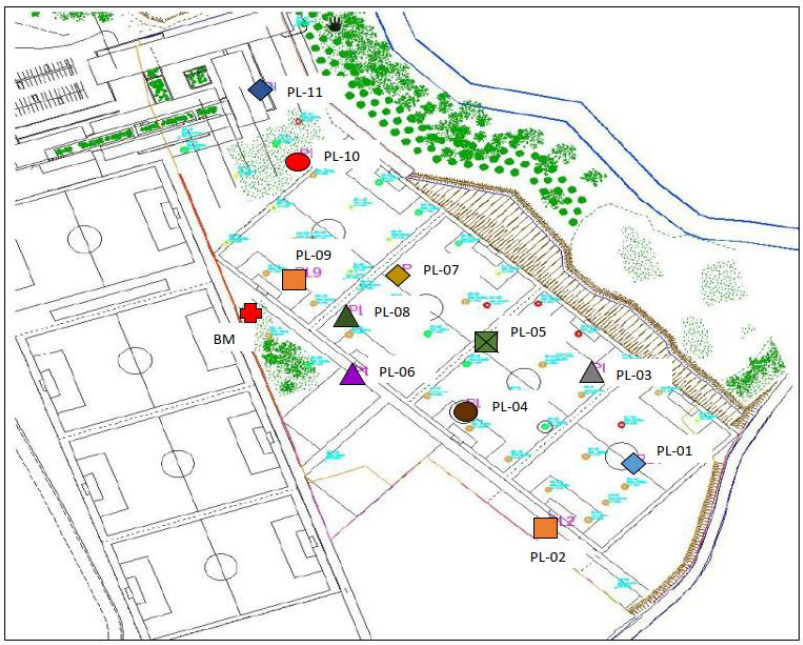


Figura 3. Posicionamento das placas de recalque

Por se tratar de obra sobre solos moles, o monitoramento dos recalques por placas possibilita a construção de curvas recalque x tempo, que são utilizadas para estimar o grau de adensamento alcançado e prever recalques futuros. Tais informações são fundamentais para definir o momento adequado para a execução de estruturas definitivas, reduzindo riscos de deformações excessivas ou patologias estruturais (Pinto, 2006).

3 ANÁLISE DE RECALQUES

3.1 Análise analítica

Para essa análise, utilizam-se três formulações principais para realizar as estimativas necessárias. A estimativa do recalque primário (ρ) do aterro, decorrente do adensamento da argila mole ao longo do tempo - causado pela lenta expulsão de água dos vazios do solo - é obtida a partir da Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi.

Além disso, considera-se que a pressão de pré-adensamento é determinada pelo produto da Razão de Sobreadensamento (OCR) pela tensão vertical efetiva inicial.

Por fim, o solo é discretizado em camadas com 1 m de espessura cada, e o recalque total do aterro é estimado pela somatória das compressões individuais de cada uma dessas camadas. A partir desse procedimento, torna-se possível determinar o tempo necessário para a ocorrência de determinados percentuais de recalque. Essas determinações são apresentadas nas tabelas a seguir:

Tabela 2. Cálculo dos recalques para os 5 perfis.

Camada de solo	D (Mpa)	γ (kN/m³)
Argila siltosa, marrom amarelado	0,15	14,5
Silte argiloso, cinza escuro	0,10	17,5
Nível d'água	1,10	m

Tabela 3. Tensão efetiva por camada por perfil

Camada de solo	Tensão efetiva no meio da camada (kPa)				
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
Argila siltosa, marrom amarelado	15,2	18,7	16,2	12,3	0,0
Silte argiloso, cinza escuro	0,0	0,0	25,1	27,7	3,5
Δσ (acréscimo de tensão)			57 kPa		

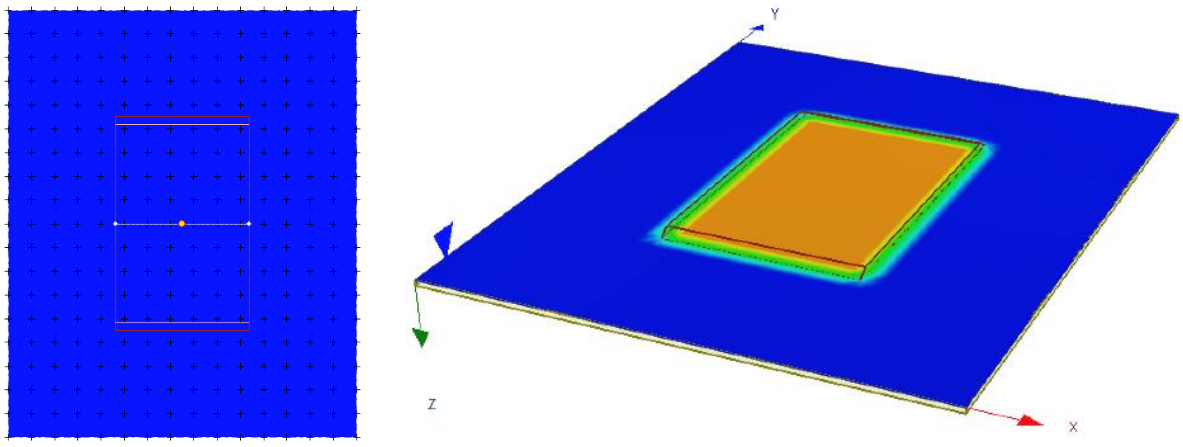
Tabela 4. Recalque por camada por perfil

Camada de Solo	Recalque por camada de solo (cm)				
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
Argila siltosa, marrom amarelado	8,0	12,9	8,7	6,5	0,0
Silte argiloso, cinza escuro	0,0	0,0	5,7	13,7	20,0
Σ Recalque (cm)	8,0	12,9	14,4	20,1	20,0

3.2 Modelagem computacional

Para o desenvolvimento deste estudo foi empregado o software RocScience Settle3D v.2.0. Este é um programa tridimensional para a análise de recalques e adensamento sob fundações, aterros e escavações de superfície. O software Settle3D combina a análise de adensamento unidimensional com o poder e os recursos de visualização de programas tridimensionais mais sofisticados. É possível personalizar o perfil de solo e as condições de carregamento, visualizando os resultados no modelo criado, em 3D. A simulação pode incluir diversos estágios e o cálculo de adensamento pode considerar recalques primários e secundários (fluência), em intervalos de tempo determinados pelo usuário, definidos como estágios. Diversos materiais, lineares e não lineares, podem ser modelados para compor o perfil do terreno. Pode-se variar o nível d'água nos estágios da simulação e condições de drenagem horizontal e vertical podem ser especificadas.

Recalques, tensões e poropressões são calculadas no volume tridimensional e os resultados podem ser coloridos em isolinhas em qualquer plano horizontal ou vertical, ou plotados ao longo de qualquer linha definida pelo usuário. Os resultados interpretados podem ser exportados para planilhas do Microsoft Excel.



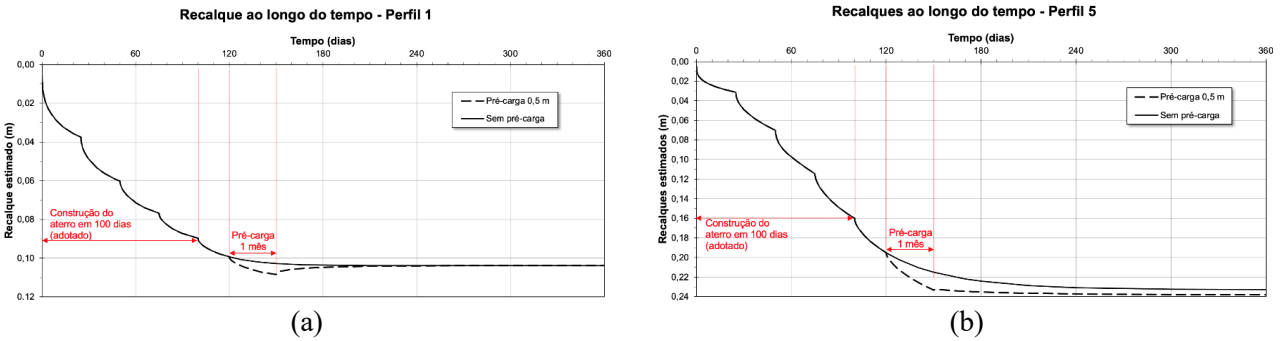
(a) (b)

Figura 4. Imagens do Software. (a) Modelo visto em planta (b) Visualização dos recalques após 720 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RECALQUES

As previsões de recalques variam de 8,0cm (limite inferior/cálculo analítico) a 23,2cm (limite superior/modelagem numérica) de acordo com os perfis de subsolo e já levando-se em consideração todo tempo de execução e a construção do aterro em etapas. Foi destacado que todo este cálculo de recalques, bem como o tempo adensamento deveram passar por um processo de monitoramento dos recalques por meio dos ensaios de placa para validação de todo o estudo, algo que também reforça e está de acordo com a avaliação.

Assim, para a avaliação dos recalques, em favor da segurança, adota-se o pior caso de recalque absoluto (maior valor) e o pior caso de recalques distorcionais (maior diferença mín/máx) entre os pontos de sondagens e se utilizando de ambas as metodologias de cálculo: analítica e computacional (modelo numérico). Abaixo seguem imagens dos ensaios de recalque ao longo do tempo do perfil de maior e menor recalque:



(a) (b)

Figura 5. Recalque ao longo do tempo para o Perfil 1. (a) Menor recalque (b) Maior recalque.

Um fator que se pode observar é que existem algumas pequenas curvas no gráfico, isso ocorre por conta do monitoramento contínuo durante a execução gradativa do aterro. Para melhor entendimento e complemento da resolução foi montada uma Tabela que mostra os cálculos analíticos e numéricos para os 5 perfis estudados:

Tabela 5. Resumo - Resultados: Cálculo Analítico e Modelo Numérico.

Camada de Solo	Recalque por camada de solo (cm)				
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
Recalque ANALÍTICO (cm)	8,0	12,9	14,4	20,1	20,0
Recalque MODELO NUMÉRICO (cm)	10,4	14,3	16,7	21,3	23,2
Tempo p/ 95% do adensamento s/ pré-carga (dias)	115	180	150	255	165
Tempo p/ 95% do adensamento c/ pré-carga (dias)	115	145	130	195	135

4.1. Monitoramento dos recalques

No projeto foram colocados 11 instrumentos para verificação e estudo dos recalques, porém apenas o PL-10 e PL-07 serão apresentados no artigo.

Comparando-se as duas placas de recalque, verifica-se que a PL-10 apresentou deformações maiores que a PL-07, indicando possível variabilidade geotécnica do subsolo, como diferenças de espessura de camadas compressíveis ou de propriedades geotécnicas entre os pontos monitorados. Esse comportamento é comum em depósitos de origem aluvionar ou em solos moles, nos quais a heterogeneidade do material pode gerar respostas distintas ao carregamento.

Observa-se que a placa de recalque PL-07 apresentou um deslocamento vertical máximo da ordem de 7,5 a 8,0 cm. Esse valor encontra-se próximo do limite inferior dos recalques previstos, principalmente quando comparado ao Perfil 1, cujo recalque analítico estimado é de aproximadamente 8,0 cm. O comportamento ao longo do tempo mostra que os recalques permaneceram pequenos durante o início do monitoramento e foi notado também que quando foi terminado o aterro, ou seja, a linha do aterro se manteve constante, isso ocorre quando os recalques diminuem, uma vez que o maior recalque ocorre na execução do aterro.

Por outro lado, a placa PL-10 registrou recalques significativamente maiores, atingindo valores próximos de cerca de 11 cm. Esse valor se aproxima mais das previsões intermediárias dos modelos analíticos e numéricos, como aquelas associadas aos Perfis 2 e 3, cujos recalques variam aproximadamente entre 12,9 cm e 16,7 cm.

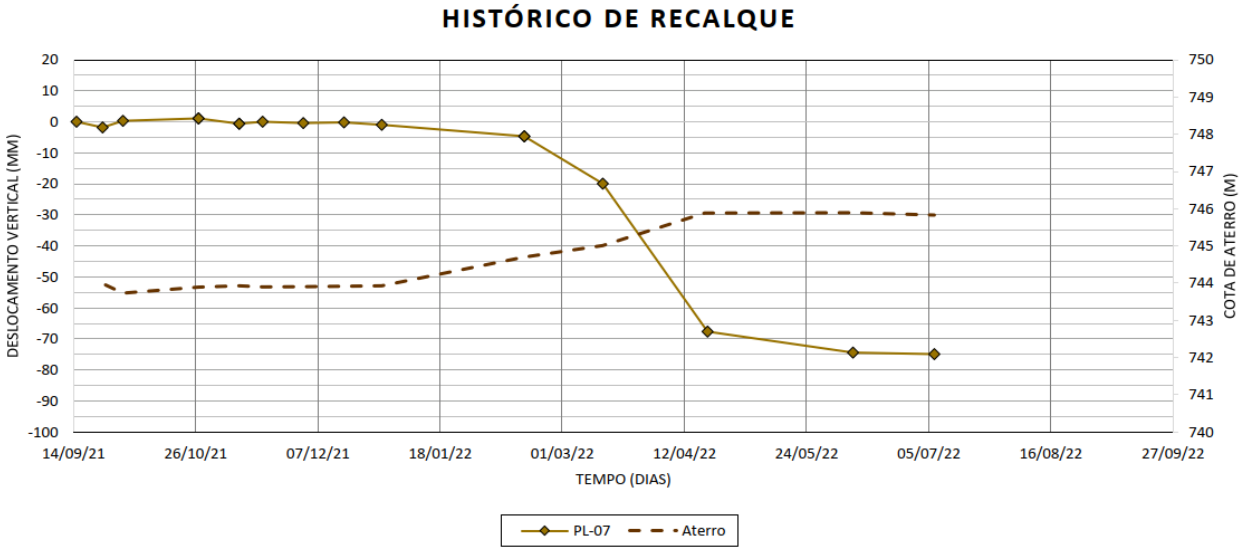


Figura 6. Histórico de Recalque PL-07

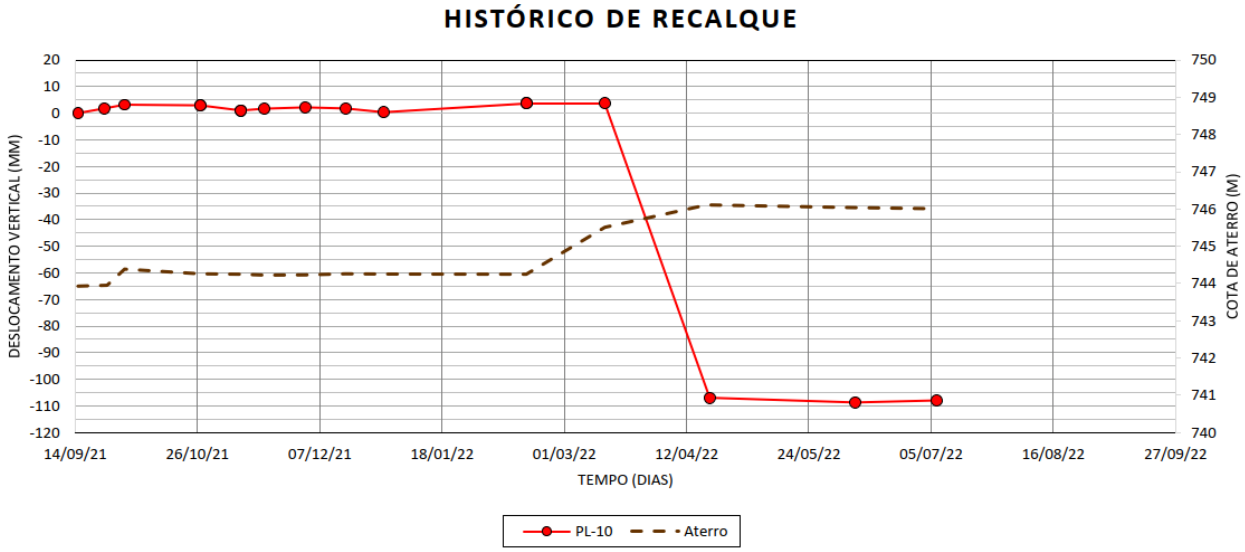


Figura 7. Histórico de Recalque PL-10.

5 CONCLUSÕES

Conforme as modelagens realizadas, estima-se que os recalques decorrentes da construção dos aterros no Centro de Treinamento RedBull Bragantino situem-se, de forma realista, entre 8 cm e 23 cm, correspondendo, respectivamente, aos limites inferior e superior obtidos pelos cálculos analíticos e pelos modelos computacionais. Nesse contexto, o monitoramento dos recalques constitui elemento fundamental para a tomada de decisão ao longo da execução da obra.

A instrumentação geotécnica deverá ser composta por placas de recalque instaladas sobre o terreno natural, cujos resultados poderão ser utilizados para a realização de retroanálises e eventual ajuste dos parâmetros geotécnicos adotados. Dessa forma, o acompanhamento sistemático será determinante para o andamento dos trabalhos e para a validação dos cálculos apresentados neste parecer. Ademais, a execução dos aterros deverá ser acompanhada de modo contínuo, a fim de verificar o comportamento previsto e possibilitar,

se necessário, a adoção de medidas mitigadoras relacionadas ao desenvolvimento dos recalques, preservando o desempenho dos sistemas de drenagem e as condições adequadas de utilização dos campos de futebol.

Por fim, os recalques medidos em campo apresentam ordem de grandeza compatível com as previsões de projeto, situando-se dentro da faixa esperada pelos métodos de cálculo e pelas modelagens numéricas. O comportamento observado também é coerente com o processo de adensamento de solos compressíveis sob carregamento de aterro, caracterizado por uma fase inicial de recalque reduzido, seguida por aumento da taxa de deformação durante o alteamento do aterro e posterior tendência de estabilização ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEF (2004). Associação brasileira de empresas de engenharia de fundações e geotecnia. *Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos ABEF. 3ª edição revisada e ampliada*. São Paulo: PINI.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.

Christian, J.T.; Ladd, C.C; Baecher, G.B. (1994). Reliability Applied to Slope Stability Analysis. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(12): 2180–2207.

Stahl, R.; Moraes, J. Dinâmica de uso e ocupação de várzeas em bacias hidrográficas do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2018, Florianópolis. Proceedings... Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2018.

Dominoni, A. L. Análise do comportamento de aterros sobre solos moles no Porto de Suape. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15., 2011, Gramado. Proceedings... Gramado: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2011.

Mesri, G.; Rokhshar, A. Composition effects on the coefficient of secondary compression. In: ASCE SPECIALTY CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH, 5., 1974, Stanford. Proceedings... Stanford: Stanford University, 1974.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Estudo geotécnico preliminar: várzeas do Rio Atibaia. São Paulo: IPT, 2015. Relatório técnico n. 85/2015.

Campanha, I. A.; Ferronato, R. A. Tectônica do Cinturão Ribeira Central: domínios Socorro-Guaxupé e Serra do Itaberaba. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 499-510, dez. 1998.

Ricci, J. C.; Tominaga, L. K.; Ferreira, F. P. Solos moles aluvionares na região de Campinas-Atibaia: comportamento compressível e recomendações para aterros. Solos e Rochas, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 123-138, 2012.