

Aterro Leve de Argila Expandida Confinada sobre Solos Moles em Encontro de OAE Ferroviária: Estudo De Caso Em Cubatão-SP

Enrique Marchetti Rios

Engenheiro Civil, Larengue – Lauro Rios Engenharia Ltda, São Paulo, Brasil, ico.rios@gmail.com

RESUMO: O artigo descreve um estudo de caso para uma solução alternativa em um encontro de obra de arte especial na duplicação de uma ponte ferroviária sobre o Rio Cubatão, em Cubatão - SP. Devido à ocorrência de camadas de solos moles adensáveis, a ponte existente foi construída com um comprimento adicional, além das margens do rio, a fim de evitar a realização de aterros altos sobre solos moles nos encontros. Da mesma forma, o projeto da duplicação manteve o conceito semelhante. Durante as obras, uma série de interferências não mapeadas no projeto, além de problemas nos processos de desapropriação, demandou a execução de serviços extraordinários de remanejamento, que impactaram diretamente o cronograma previsto. Em vista disso, já que se tratava do caminho crítico da obra, foi desenvolvida, junto à construtora, uma solução alternativa de engenharia, que tinha como concepção básica a conversão de parte do trecho elevado em um aterro confinado por muros de concreto armado. A viabilização técnica da alternativa impunha a redução do peso do aterro com material convencional para minimizar os efeitos indesejados na camada de solo adensável: instabilidade global, recalques diferenciais e efeito de cargas horizontais nas fundações da obra existente (efeito de Tschebotarioff). A solução encontrada foi a utilização de argila expandida como material de aterro leve. Por se tratar de uma aplicação pouco conhecida no país, não se encontram normas e procedimentos de execução e controle de aterros deste tipo, bem como informações sobre os seus parâmetros de resistência. Para a elaboração do projeto, foram realizados ensaios triaxiais e de caracterização em amostras de argila expandida ref. 2215 (ficha técnica Cinexpan). Os resultados indicaram valores representativos de densidade (500 kg/m^3), ângulo de atrito interno em torno de 40° e coesão nula. Para a definição de procedimento e controle de compactação, foram feitas observações em campo e acompanhamento monitorado de recalques após a conclusão da obra e início de operação da via. A solução estrutural, considerações geotécnicas e resultados do monitoramento para verificação de desempenho são descritos no corpo do artigo.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Leve, Solos Moles, Argila Expandida, Obras de Arte Ferroviárias, Encontro.

ABSTRACT: The article describes a case study for an alternative solution in the encounter of a special artwork in the duplication of a railway bridge over the Cubatão River, in Cubatão - SP. Due to the occurrence of compressible soft soil layers, the existing bridge was built with an additional length beyond the riverbanks, to avoid high embankments on soft soils at the encounters. Similarly, the duplication project maintained the same concept. During the works, a series of unmapped interferences in the project, along with problems in the expropriation processes, demanded the execution of extraordinary relocation services, which directly impacted the planned schedule. In view of this, since it was the critical path of the work, an alternative engineering solution was developed with the contractor, whose basic concept was the conversion of part of the elevated section into an embankment confined by reinforced concrete walls. The technical feasibility of the alternative imposed the reduction of the embankment's weight with conventional material to minimize undesirable effects on the compressible soil layer: global instability, differential settlements, and the effect of horizontal loads on the foundations of the existing structure (Tschebotarioff effect). The solution found was the use of expanded clay as lightweight embankment material. As this is a little-known application in the country, there are no norms and procedures for the execution and control of embankments for this kind of material, nor information on its resistance parameters. For the project development, triaxial and characterization tests were carried out on samples of expanded clay with granulometry 2215, produced by Cinexpan. The results indicated representative values of density (500 kg/m^3), internal friction angle around 40° , and zero cohesion. For the definition of compaction procedure and control, field observations were made, and settlement monitoring was conducted after the completion of the work and the beginning of the track's operation. The structural solution, geotechnical considerations, and monitoring results for performance verification are described in the body of the article.

KEYWORDS: Lightweight Embankment, Soft Soils, Expanded Clay, Railway Structures, Bridge Abutment

1. INTRODUÇÃO

Durante a execução das obras de reforma e ampliação de um pátio ferroviário, uma série de interferências não mapeadas no projeto e problemas nos processos de desapropriação demandaram a execução de serviços extraordinários de remanejamento, que impactaram diretamente o cronograma previsto em contrato. A ponte para a duplicação da via ferroviária sobre o Rio Cubatão (Fig. 1) foi projetada com percurso paralelo à ponte existente que, devido à ocorrência de camadas de solos moles adensáveis, foi construída com um comprimento adicional além das margens do rio para evitar a realização de altos aterros sobre solos moles nos encontros.



Figura 1. Localização da Ponte Cubatão

Como forma de mitigar os impactos dos atrasos no empreendimento, a construtora solicitou o estudo de uma solução alternativa de engenharia para um trecho da ponte. A ideia inicial era a substituição de dois vãos nas extremidades, junto ao encontro da ponte, por um encontro em terra armada ou aterro convencional entre muros de arrimo. Durante o desenvolvimento dos estudos, foi realizada uma série de ensaios e prospecções na área de interesse. Os parâmetros geotécnicos obtidos, característicos de um solo mole, impuseram a necessidade de adoção de uma fundação profunda para o aterro ou redução do peso do material a ser empregado no aterro, a fim de minimizar os efeitos indesejados na camada de solo adensável: instabilidade global, recalques diferenciais e efeito de cargas horizontais nas fundações da obra existente (efeito de Tschebotarioff).

A solução, definida foi a utilização de argila expandida como material de aterro leve, confinada em uma estrutura composta por dois muros de arrimo engastados em uma laje de fundo em concreto armado.

2. A SOLUÇÃO ADOTADA

Conforme ilustrado nas Fig. 2 a 5, a solução adotada substituiu os dois primeiros vãos de 35 metros da ponte, originalmente projetado em vigas pré-moldadas de altura igual a 2,45 metros em concreto protendido, por uma contenção em aterro leve. O aterro foi realizado em argila expandida, com altura da camada aproximada de 3,35 metros e repousando sobre uma laje de concreto armado com espessura de 45 centímetros. Lateralmente, a argila ficou confinada por muros concreto armado, e superiormente por uma capa de aterro convencional de espessura igual a 1,15 metros.

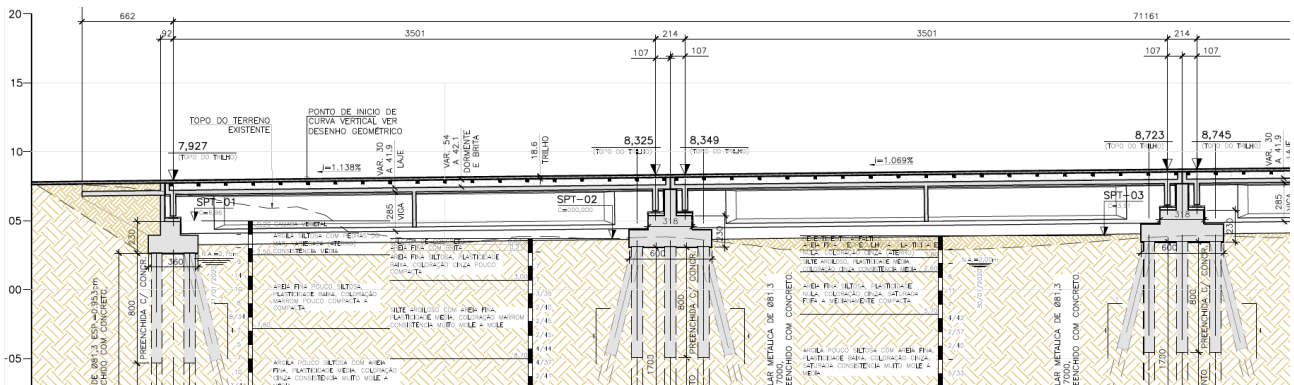


Figura 2. Projeto original com vigas protendidas pré-moldadas

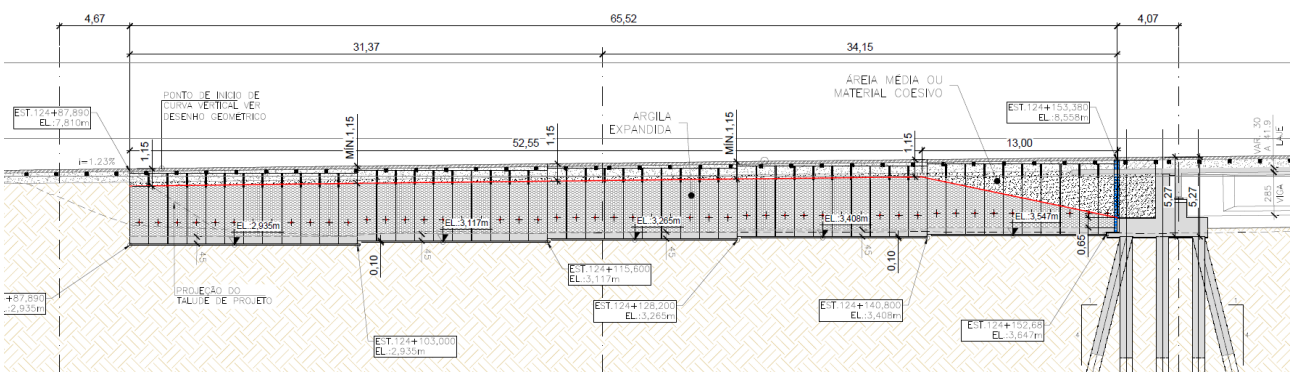


Figura 3. Seção longitudinal do projeto adotando alternativa com aterro leve

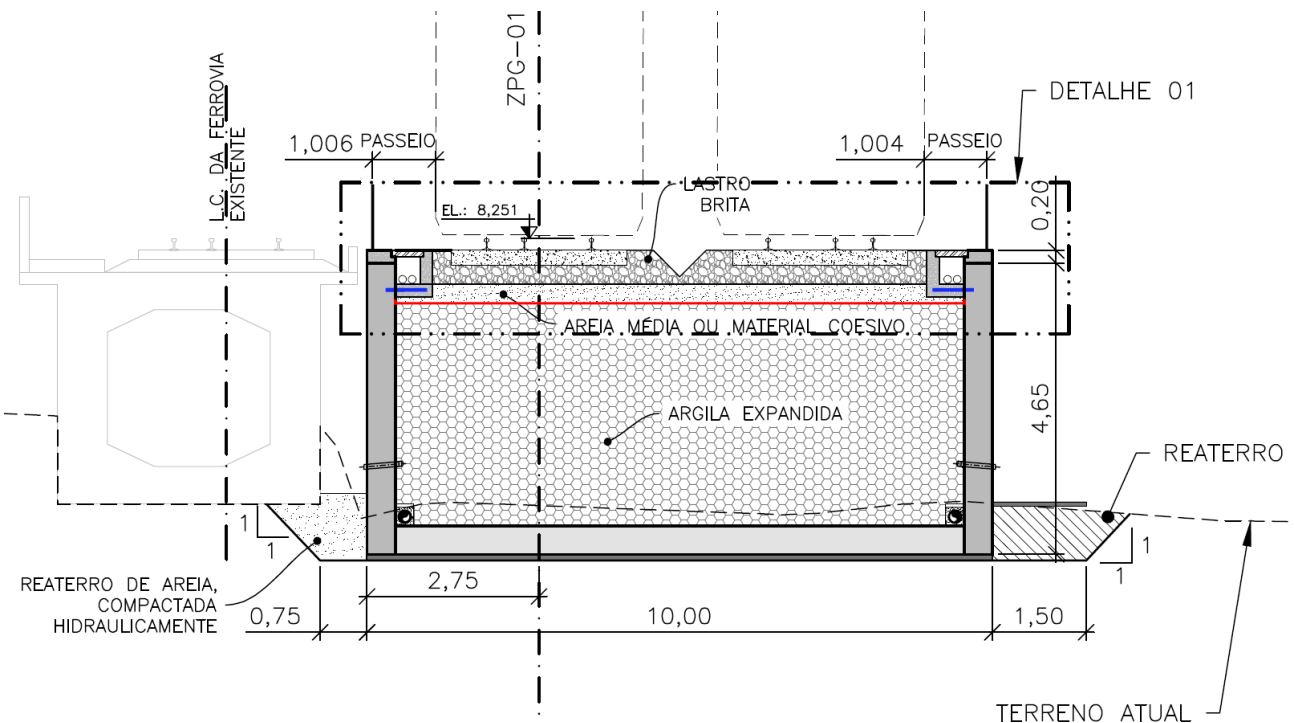


Figura 4. Seção transversal típica do projeto adotando alternativa com aterro leve

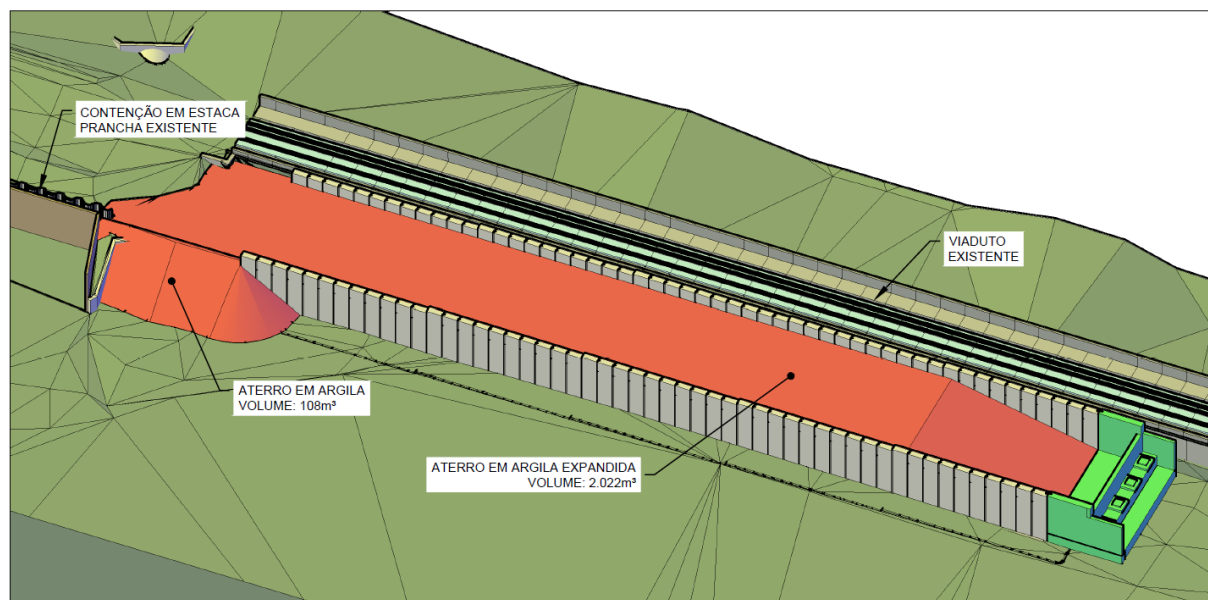


Figura 5. Ilustração em 3D do aterro em argila expandida

Visando o aumento da estabilidade global e redução de recalques, dentre as alternativas sugeridas no Procedimento DNER-PRO 381/98 – “Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias” do DNER, optou-se pela alternativa de uso de aterros leves. Dentre os materiais sugeridos pelo DNER na Tabela 1, a argila expandida mostrou-se com a mais viável para o caso, devido ao seu peso, preço e disponibilidade.

Tabela 2. Materiais leves que podem ser empregados em aterros
 (Fonte: DNER-PRO 381/98)

Material do Aterro	Peso Específico (kN/m ³)
Poliestireno expandido (Isopor ou similar)	1 a 1,5
Argila expandida	5 a 10
Serragem	8 a 10
Cinza volante	10 a 14

No presente caso, o material leve utilizado foi a argila expandida tipo 2215 (referência CINEXPAN) com as características apresentadas na Tabela 2. A Argila Expandida é um agregado leve e isolante constituído de uma crosta microporosa rígida e de alta resistência, com o interior formado por uma massa cerâmica porosa. O processo de fabricação é realizado em forno rotativo de alta tecnologia, a uma temperatura de 1.200°C. É um produto natural, incombustível, não inflamável e não se degrada com o tempo.

Tabela 3. Propriedades físico-químicas da argila expandida ref. 2215
 (Fonte: Ficha Técnica CINEXPAN)

Propriedades Físicas	
Densidade aparente (kg/m ³)	500 ± 10%
Massa específica (g/dm ³)	0,64
Classes granulométricas (mm)	15 - 22
Resistência mecânica	1,8 Mpa ou 18,4 Kgf/cm ²
Condutividade térmica	0,10 a 0,16 W/(m.K)
Isolamento acústico	média 44dB

Para caracterização dos parâmetros geotécnicos da argila empregada, foi realizado um ensaio triaxial pelo Laboratório de Geotecnia Ambiental – Geoamb, da Universidade Federal da Bahia. Os principais resultados encontram-se ilustrados nas Fig. 6 e 7, e resumidos em trecho do relatório do laboratório a seguir.

“Os resultados dos ensaios executados estão apresentados em anexo. Conforme se pode observar, o material apresenta elevados valores de ângulo de atrito interno, em torno de 40 graus, e um coeficiente de coesão que pode ser ajustado como nulo, apesar de, para pequenas tensões confinantes, notar-se que a resistência dos CPs foi maior que a prevista pela envoltória ajustada.

Isto nos leva a um uso de parâmetros de resistência a favor da segurança e dispensa o uso de envoltórias bilineares. O surpreendentemente elevado valor de ângulo de atrito deve estar relacionado ao caráter deformável das partículas sólidas do material, os quais são responsáveis por gerar áreas de contato não desprezíveis em relação à área total do plano de ruptura.

Praticamente todas as amostras apresentaram comportamento dilatante, mesmo para as maiores tensões de confinamento, indicando estarmos próximos do índice vazios mínimo do material ou que a densidade de 0,50 g/cm³ conduz o solo a um comportamento de areia compacta, inclusive com a formação de um valor de tensão de pico na ruptura.”.

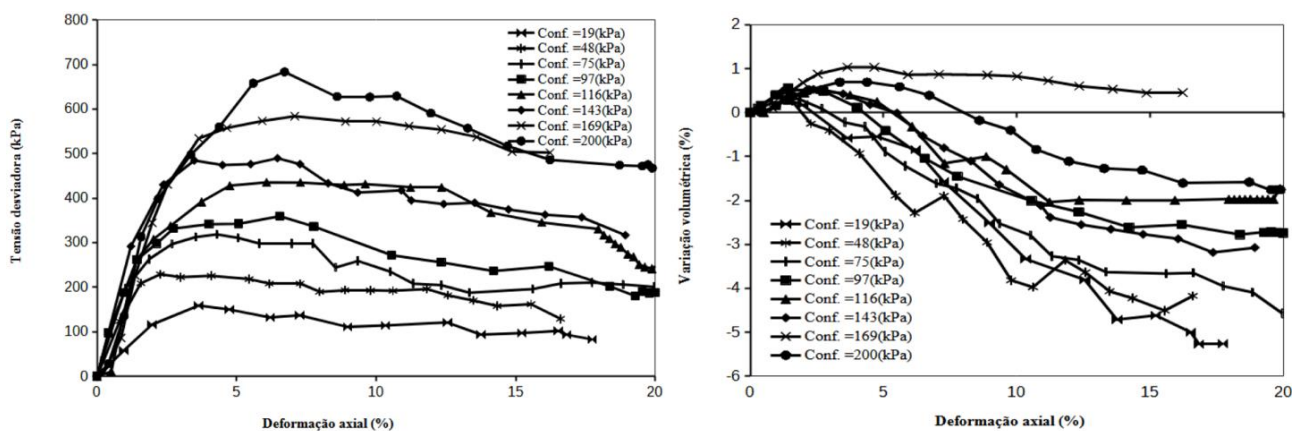


Figura 6. Resultados dos ensaios triaxial CD: a) Tensão desviadora x deformação axial; b) Deformação volumétrica x deformação axial

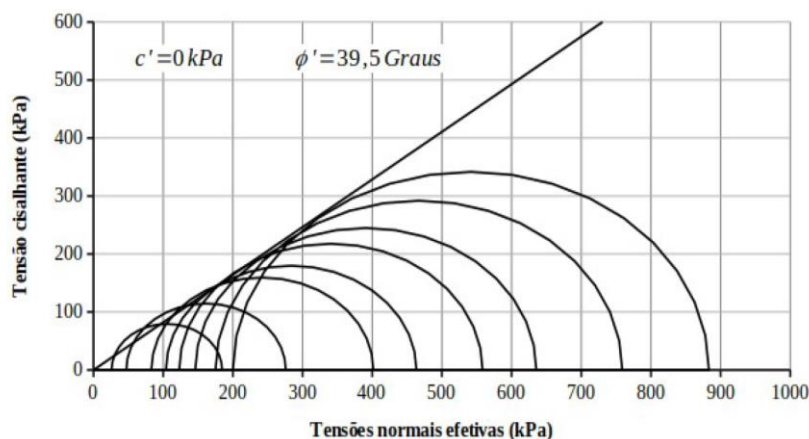


Figura 7. Parâmetros obtidos para o critério de ruptura de Mohr-Coulomb

3. INVESTIGAÇÕES E VERIFICAÇÕES GEOTÉCNICA

Para definição dos parâmetros geotécnicos do terreno, foram realizadas sondagens a percussão (SPT-01, SPT-02, SPT-03, SPT-101, SPT-102) e ensaios CPTU (CPTU-01, CPTU-02, CPTU-03), conforme apresentado nas Fig. 5 e 6. Além disso, foram realizados 5 (cinco) ensaios de palheta na camada de solo mole argiloso na posição das sondagens, ensaios de cisalhamento direto em 16 (dezesesseis) corpos de prova e ensaios de caracterização.

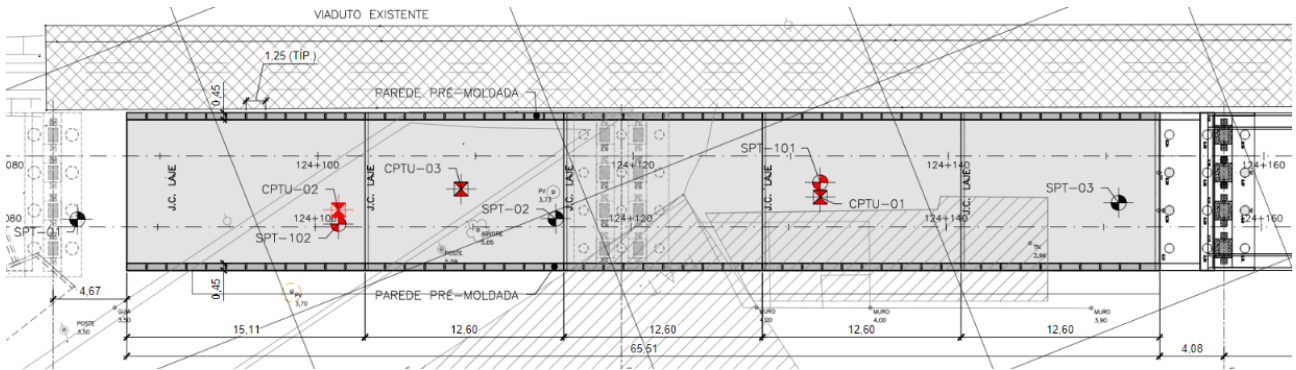


Figura 8. Localização das sondagens – Planta

3.1. CPTU – Resultados Gráficos

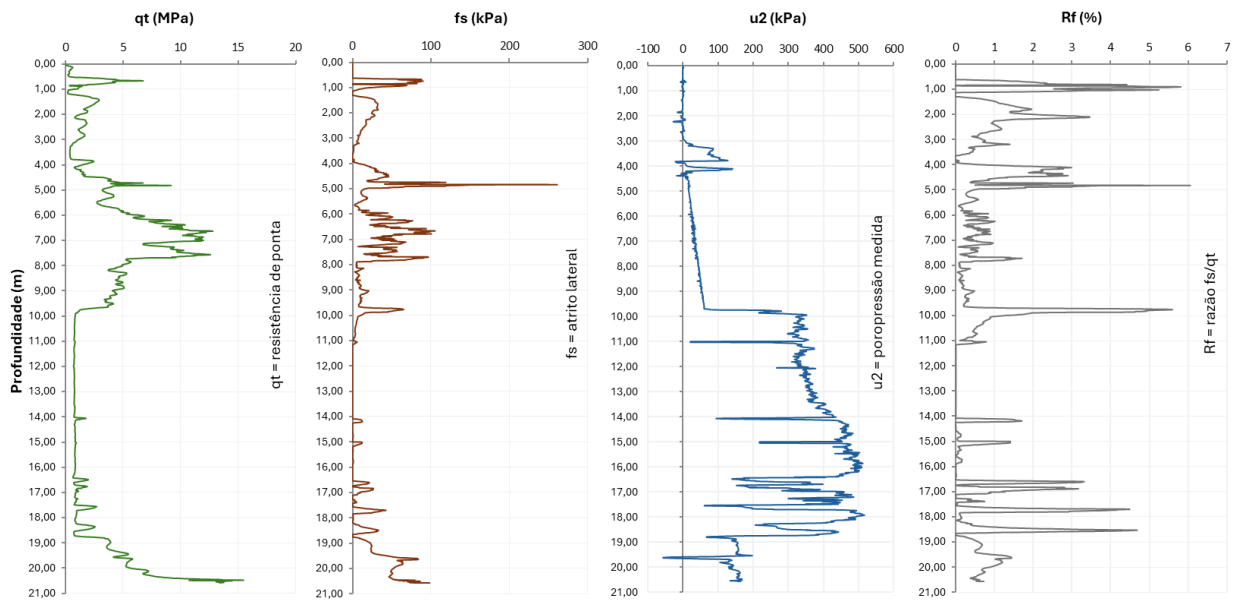


Figura 9. Resultados Gráficos do ensaio CPTU-01

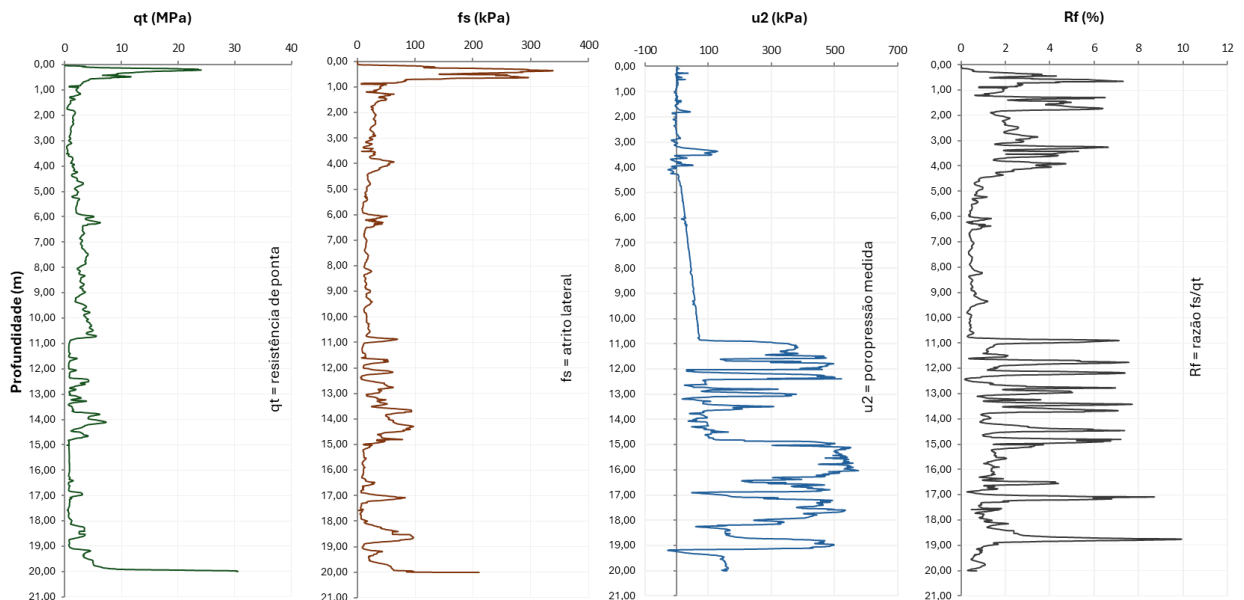


Figura 10. Resultados Gráficos do ensaio CPTU-02

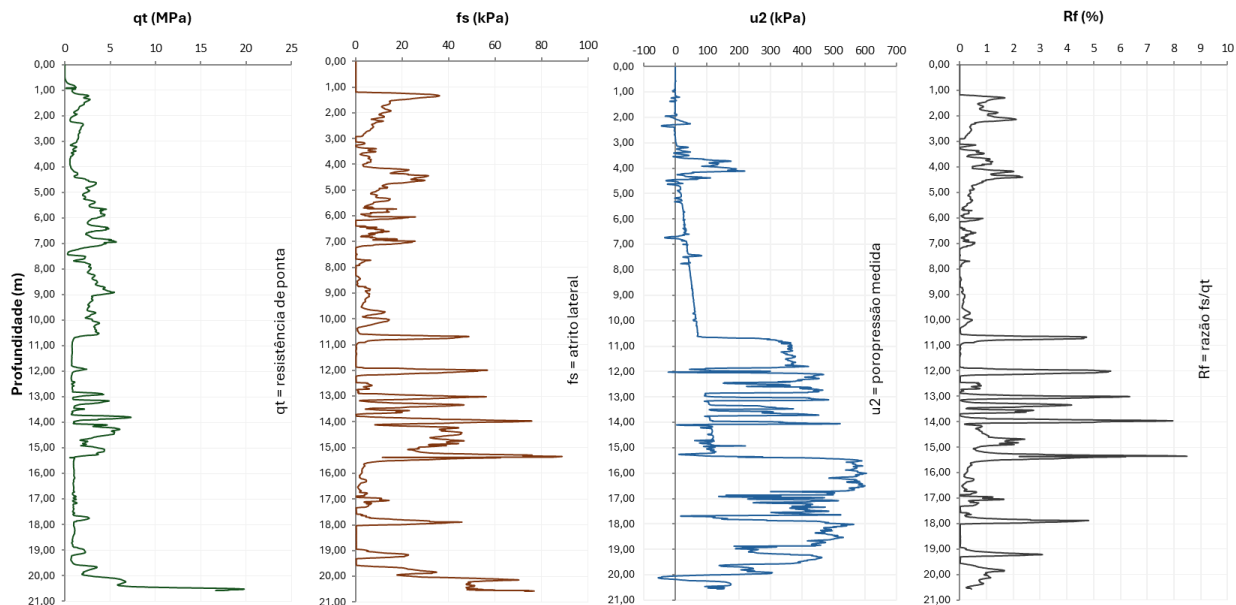


Figura 11. Resultados Gráficos do ensaio CPTU-03

3.2. Parâmetros de resistência geotécnica

Com base em correlações a partir dos ensaios de CPTU, a pressão de sobre-adensamento da argila mole foi estimada em 56 kPa. A Tabela 4 ilustra os parâmetros geotécnicos do CPTU mais significativo. Já os valores encontrados do fator de segurança para estabilidade global foram calculados com programa específico pelo método de equilíbrio limite.

Tabela 4. Parâmetros geotécnicos CPTU-01 e FS para condição não drenada

FS = 1,97	Prof. (m)	ϕ' (°)	c' (kPa)	C_u (kPa)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
Laje de concreto armado	-	-	1.000,0	-	25,0	25,0
Areia	0,0 a	0,5	30,0	-	17,0	18,0
Areia siltosa	0,5 a	3,2	30,0	5,0	17,0	18,0
Argila muito mole	3,2 a	4,2	-	-	9,1	14,5
Areia siltosa	4,2 a	6,0	30,0	5,0	17,0	18,0
Areia	6,0 a	7,8	30,0	-	17,0	18,0
Areia siltosa	7,8 a	9,7	30,0	5,0	17,0	18,0
Argila muito mole	9,7 a	19,0	-	-	11,6	14,5
Areia siltosa	19,0 a	-	30,0	5,0	17,0	18,0

3.3. Estimativa de Recalques em Função do Tempo

Os recalques foram estimados por integração dos parâmetros de compressibilidade da argila, e espraçamento de tensões, em função da profundidade obtidos por meio de correlação dos ensaios de CPTU.

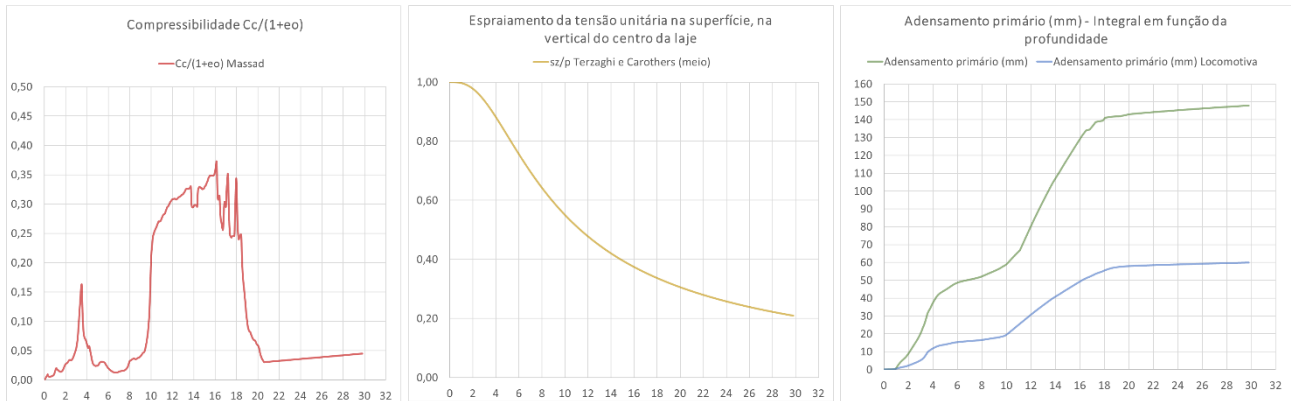


Figura 12. Gráficos de a) compressibilidade; b) espraioamento e c) integração dos recalques para o CPTU-01.

Resumo dos resultados obtidos para a estimativa dos recalques:

- 60 mm até o início de operação;
- 45 mm em 2 anos;
- 43 mm nos 25 anos seguintes.

3.4. Monitoramento de Recalques

A Fig. 13 ilustra o monitoramento de recalques realizado em vários pontos da obra no trecho em questão, desde o início do aterro, em setembro de 2022, até o último levantamento realizado em agosto de 2023. Apesar de problemas com destruição de marcos durante a execução da obra, pode-se concluir que os recalques reais são significativamente inferiores aos previstos. Após o início de operação, os marcos estão sendo mantidos e, em função da estabilização observada, o período entre medições foi aumentado.

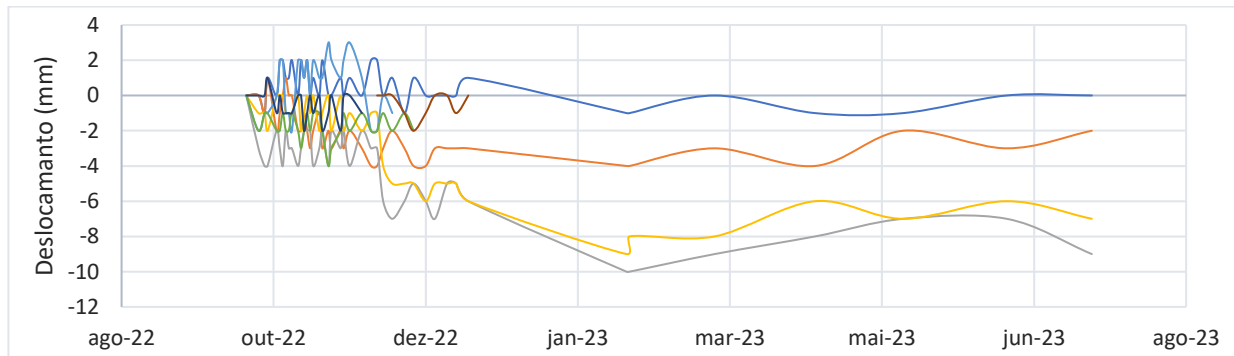


Figura 13. Gráfico de monitoramento de recalques recalque na via executada sobre aterro leve



Figura 14. Imagens a) e b) da obra execução e c) em operação

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DNER. DNER-PRO 381/98: “Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias”;
 CINEXPAN – Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda. “Ficha Técnica Argila Expandida Tipo 2215”.