



Aterros Sobre Solos Moles: Estudo de caso em Projeto de Acesso Multimodal

Juliana Jacomini Menegucci, Eng.

Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, julianamenegucci@gmail.com

Camila da Silva Barbosa, Acad.

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, camillabarbosa94@gmail.com

Fábio Krueger da Silva, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, fabio.krueger@ifsc.edu.br

Cesar Schmidt Godoi, Msc.

UNISUL / Tractebel Engineering, Florianópolis-SC, Florianópolis, Brasil cesar.godoi@unisul.br

RESUMO: A viabilização de projeto e execução de aterros sobre solos moles é um desafio crescente devido as características depósitos de solos moles e, os custos inerentes para solução geotécnica. De modo a possibilitar a construção do Terminal Portuário do Mearim (TPM), localizado na Baía de São Marcos (MA), foi realizado o projeto conceitual do aterro para acesso multimodal e uso da retroárea. O perfil geotécnico apresenta uma camada de 5 metros de espessura constituída por argila muito mole, seguida de uma camada de 7 metros de espessura de argila média. Para a avaliação dos recalques por adensamento primário do solo em função das cargas associadas aos aterros, foram realizadas análises com auxílio dos softwares Settle3D e, para a análise de estabilidade dos taludes foi utilizado o software Slide, com uma ampla investigação geológico-geotécnica. Para garantir a estabilidade dos aterros, foram estudadas soluções alternativas para aceleração dos processos de adensamento através do emprego de sobrecarga e geodrenos, e diminuição de volumes de aterro através do uso de geogrelhas. As soluções propostas foram avaliadas com enfoque na perspectiva técnica, com apresentação de uma base econômica complementando a análise. Por fim, as alternativas apresentadas atenderam aos critérios técnicos, ficando a escolha da alternativa a ser executada restrita ao aspecto econômico da obra.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro; Solos moles; Recalques; Estabilidade de taludes.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da movimentação de cargas via terminais portuários é uma tendência mundial, sendo que no contexto nacional, existe um grande desbalanceamento e saturação das soluções logísticas marinhas nas regiões Sul e Sudeste, uma vez que todo o excedente das regiões Norte e Nordeste são exportados através destas regiões.

Neste contexto, o projeto do Terminal Portuário do Mearim (TPM), localizado na Baía de São Marcos, estado do Maranhão. O projeto deste terminal portuário prevê instalações para exportação de cargas gerais, grãos e fertilizantes. Para tal, o escoamento das cargas será realizado através de acesso tanto rodoviário, quanto ferroviário.

Embora do ponto de vista logístico, o terreno encontre-se estrategicamente situado para



acessar com facilidade a Baía de São Marcos, pelo lado oeste e, a BR-135 e a Estrada de Ferro Carajás pelo leste. Do ponto de vista geotécnico o mesmo é constituído em toda sua extensão por solos moles de baixa capacidade de suporte e elevada compressibilidade, tornando-se necessária a realização de tratamentos específicos, de forma a possibilitar a aptidão às cargas que lhe serão impostas. Adicionalmente, a área do empreendimento situa-se numa planície alagável, devido às cotas relativamente baixas e eventuais períodos de inundações.

De acordo com Oliveira e Almeida (2004), a construção sobre solos compressíveis é um desafio que se apresenta com uma frequência crescente à engenharia, em decorrência da expansão das cidades, das infraestruturas de transporte e também da crescente escassez de áreas com subsolo de melhor qualidade, em razão da ocupação pretérita das áreas mais nobres.

Almeida e Marques (2010) apontam que as baixadas litorâneas, historicamente ocupadas pelos assentamentos populacionais e, no presente, locais de implantação do sistema portuário necessário para a exportação de nossa produção, apresentam imensos depósitos de sedimentos marinhos a serem enfrentados oferecendo amplo campo de aplicação da engenharia de projeto e construção sobre as argilas moles.

As argilas moles ou solos moles são aqueles que possuem resistência não drenada inferiores a 25 kPa ou, índice de consistência menor que 0,5. São caracterizados por baixa resistência mecânica e elevada compressibilidade (FUTAI, 2010).

Segundo Palmeira e Ortigão (2004), construir um aterro alto sobre solo de fundação mole é um desafio que requer alguma solução para estabilização. Para a construção sobre solos compressíveis, duas condições devem ser atendidas: garantia de estabilidade, isto é, deve-se evitar a ruptura das fundações; e manutenção das deformações, tanto verticais (recalques)

como horizontais, dentro de limites adequados, de acordo com as características da obra (OLIVEIRA e ALMEIDA, 2004).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar algumas soluções geotécnicas possíveis para a obra de aterro sobre solo mole dos acessos rodoviário, ferroviário e retroárea, previstos para o Terminal Portuário do Mearim (TPM).

2 ÁREA DE ESTUDOS

O TPM está localizado no litoral leste da Baía de São Marcos, aproximadamente 60 km ao sul de São Luís, no município de Bacabeira, Maranhão. O local de instalação possui forma irregular, com cerca de 7 km de comprimento em direção leste-oeste e cerca de 2 a 3 km na direção norte-sul, estando estrategicamente situado para acessar com facilidade a baía pelo lado oeste e a BR-135 e a Estrada de Ferro Carajás pelo leste (Figura 1).

A área do empreendimento situa-se numa planície alagável com solos predominantemente moles de baixa capacidade de suporte. Devido às características do local, o acesso rodoviário, ferroviário e a retroárea (áreas de circulação e armazéns) deverão ser construídos sobre um aterro.

Esta região faz parte de uma zona costeira marcada por estuários e reentrâncias no noroeste do Maranhão, que constitui o maior sistema contínuo de manguezais do mundo, a Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA). Os manguezais do Estado do Maranhão são considerados os mais estruturalmente complexos do Brasil. Este aspecto é atribuído em parte às diversas características da linha de costa, às grandes quantidades de água doce, provenientes de extensos rios, às altas taxas de precipitação, bem como às altas amplitudes de maré (até 7,2 m), cuja propagação estende-se a mais de 200 km (TEIXEIRA e SOUZA FILHO, 2009).

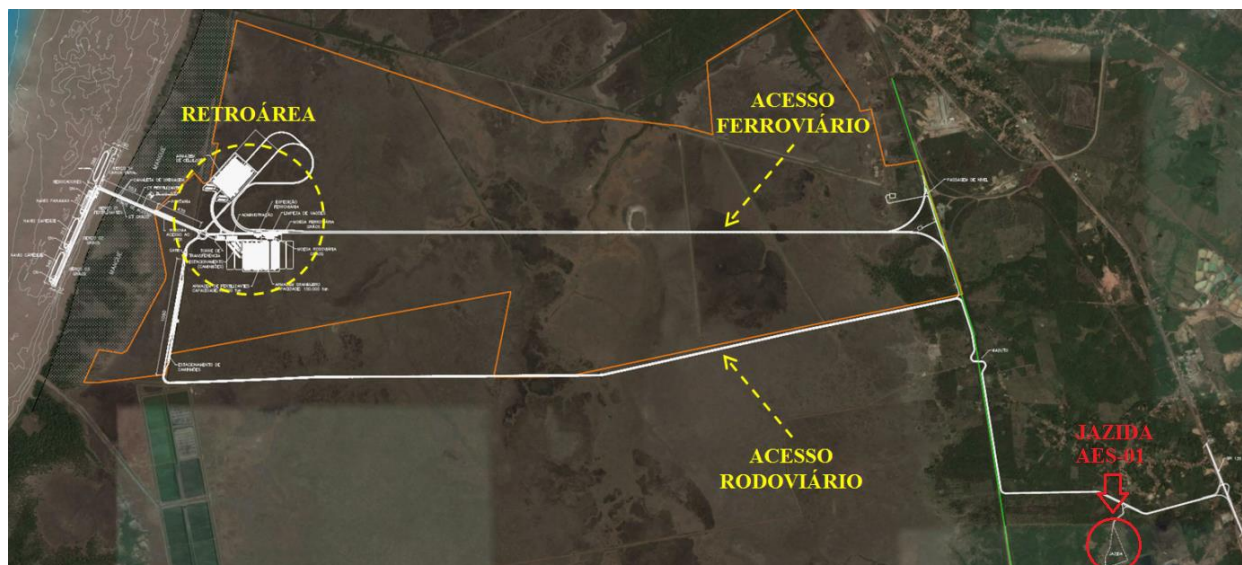


Figura 1. Imagem da localização da retroárea, traçado dos acessos rodoviários e ferroviários e jazida de empréstimo.

3 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Para efeitos do estudo de alternativas de aterro coligados com este estudo, considerou-se a opção de realização de aterros mecânicos para o acesso rodoviário, ferroviário e retroárea.

Estudos prévios identificaram jazidas terrestres com material passível de utilização no projeto do TPM. A jazida terrestre selecionada como área de empréstimo para a obra em questão, denominada AES-01 (Mangueiras) foi anteriormente identificada como área de empréstimo adequada para a duplicação, desvio e remodelação da Estrada de Ferro de Carajás (EFC) e está localizada a 15 km do eixo do acesso ferroviário do projeto.

Na Tabela 1 são apresentadas as características básicas do material proveniente da jazida terrestre considerada para o estudo do aterro.

Tabela 1. Parâmetros de resistência e peso específico do material da jazida

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Cascalho Graduado (GW)	20	0	35

A caracterização e determinação dos parâmetros geotécnicos foram realizadas na etapa de estudo de viabilidade, a qual foi realizada através de ensaios de campo, SPT, CPTu e *Vane Test*, bem como através de ensaios de laboratório (adensamento e caracterização).

A localização em planta da locação das investigações geotécnicas realizadas encontra-se na Figura 2. Na Figura 3 está apresentado um perfil esquemático relacionando a estratigrafia do solo.

Diante do perfil geotécnico e face às dimensões da área em análise, verifica-se que as camadas de argila são condicionantes para os estudos dos recalques e da estabilidade do aterro a ser executado.

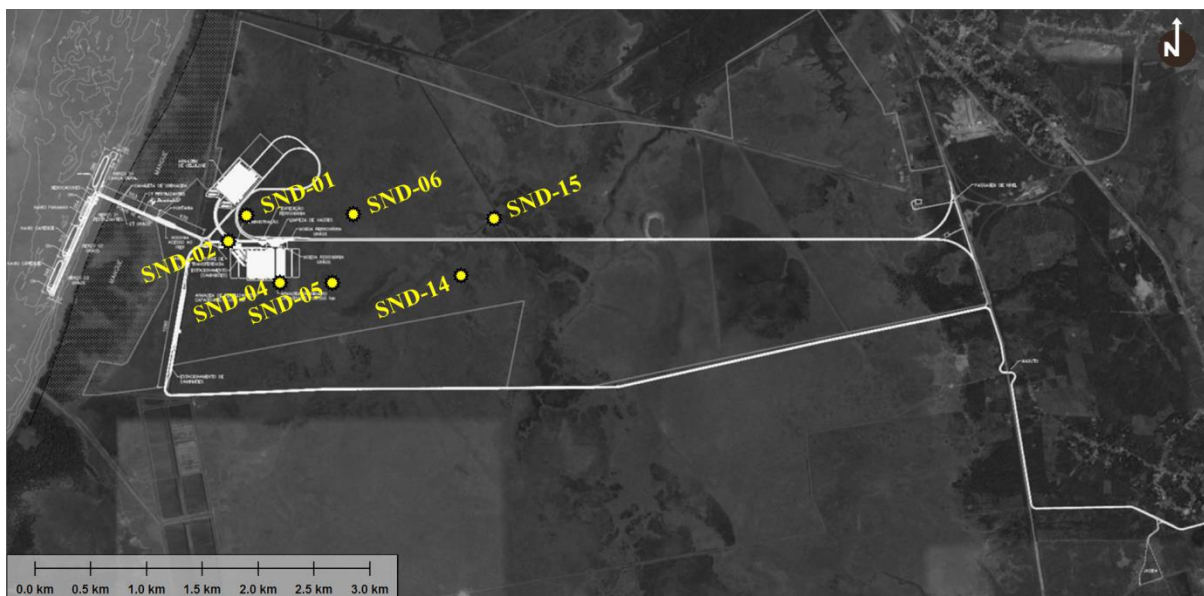


Figura 2. Localização das sondagens realizadas.

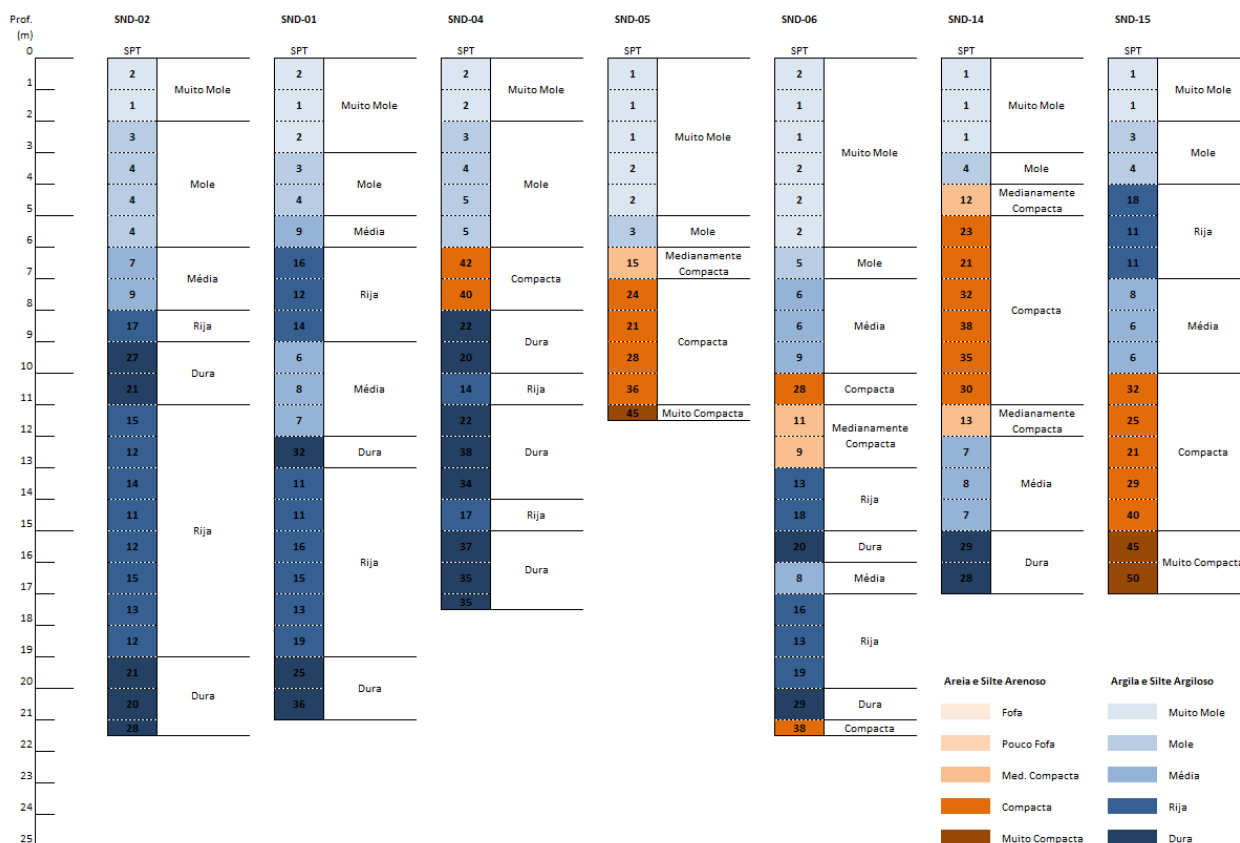


Figura 3. Perfil do terreno considerando as sondagens à percussão com ensaio SPT. (Menegucci. 2015)



A Tabela 2 apresenta os parâmetros geotécnicos definidos para o projeto determinados através dos resultados dos ensaios de campo e laboratoriais.

Tabela 2. Parâmetros de compressibilidade e resistência do solo de fundação do aterro

Parâmetro	Primeira Camada	Segunda Camada	Terceira Camada
Material	Argila Muito Mole	Argila Média	Argila Rija
Espessura da Camada (m)	7	5	9,5
γ (kN/m ³)	15	18	20
c' (kPa)	12	50	90
ϕ' (°)	0	0	0
OCR	1,5	1,5	1,5
C_c	1,71	0,67	0,30
C_r	0,19	0,067	0,031
e_0	2,79	1,59	1,23
C_v (cm ² /s)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Ch/Cv	1,5	1,5	1,5

4 ALTERNATIVAS TÉCNICAS DE PROJETO

Foram analisadas soluções técnicas para possibilitar a viabilização da obra nas seguintes áreas:

- Retroárea do terminal: Solução (A) aterros com drenos verticais para redução do tempo de estabilização dos recalques; e (B) aterros com drenos verticais para redução do tempo de estabilização dos recalques, complementados por reforço com geogrelha para reduzir volume de solo decorrente dos taludes;

- Acessos rodoviários e ferroviários: Solução (A) aterros de sobrecarga com drenos verticais para redução do tempo de estabilização dos recalques; e (B) aterros de sobrecarga com drenos verticais para redução do tempo de estabilização dos recalques, complementados por reforço com geogrelha para reduzir volume de solo decorrente dos taludes.

As sobrecargas de projeto para as diferentes instalações, assim como a parcela de recalque

admissível após entrega da obra, foram definidas previamente com base na tipologia das cargas que irão atuar nas diferentes áreas do aterro durante a vida útil do empreendimento.

O aterro foi dividido em três áreas iguais em função do uso e do recalque máximo admissível, específico de projeto, sendo:

1. Retroáreas (áreas de circulação e armazéns)
 - Sobrecarga = 0 kPa;
 - Recalque admissível = Não definido em função da solução de fundação adotada.
2. Rodovia:
 - a. Sobrecarga = 20 kPa;
 - b. Recalque admissível = 30 cm.
3. Ferrovia:
 - Sobrecarga = 50 kPa;
 - Recalque admissível = 10 cm.

O tempo limite máximo admitido em projeto para que ocorra 95% do recalque primário é de dois anos após a finalização da construção do aterro.

Na retroárea mesmo com cargas relativamente altas, sobrecargas não são requeridas nas áreas de armazém dado que, as estruturas serão projetadas sobre estacas e somente serão construídas após a estabilização do aterro (não tendo sido fornecidas informações adicionais a respeito da solução de fundação a ser adotada). Sendo assim, cargas adicionais durante o uso dos armazéns serão suportadas pelo subsolo rígido.

Nos acessos as sobrecargas de 20 kPa e 50 kPa serão mantidas até a estabilização dos recalques. Como premissa de projeto, admite-se que o aterro, acrescido da sobrecarga, esteja estabilizado quando ocorrer 95% do recalque por adensamento primário.



5 ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS

Inicialmente procedeu-se a estimativa de recalque total para as alternativas com objetivo de obter a cota final de construção dos aterros, este resultado então, serviu como dado de entrada para análise de estabilidade de taludes. Depois de finalizada a análise de estabilidade, o modelo de verificação de recalques foi retroalimentado com o layout final de projeto, para refinamento das análises de recalque.

O terreno encontra-se na cota +6,20 m, sendo, portanto, necessário executar um aterro com altura de +2,80 m após a estabilização dos recalques por adensamento primário e remoção das sobrecargas, de forma a atingir a cota de projeto (+9,00 m).

Considerando o peso específico do material do aterro ($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$) e o recalque “ Δh ”, a cota de construção dos aterros será:

1. Cota da retroárea: $+9,0 \text{ m} + \Delta h$ retroárea
2. Cota do acesso rodoviário: $+9,0 \text{ m} + 1,0 \text{ m} + \Delta h$ rodovia

3. Cota do acesso ferroviário: $+9,0 \text{ m} + 2,5 \text{ m} + \Delta h$ ferrovia

O recalque do aterro deve ser estabilizado em uma cota fixa, por tanto, é preciso efetuar um cálculo iterativo para determinar a altura do aterro necessária para atingi-la.

De forma a estimar a cota final de construção dos aterros, foram realizadas simulações com o modelo Settle3D (detalhes do programa na Figura 4). Considerando as informações características do subsolo do terreno e o nível de água na cota +6,20 m (situação mais desfavorável). O cálculo para determinação do recalque é mostrado na Figura 5 e foi realizado por iterações, resultando em:

1. Retroárea: $\Delta h \approx 3,1 \text{ m}$ (sobrecarga = 0 kPa);
2. Acesso rodoviário: $\Delta h \approx 3,4 \text{ m}$ (sobrecarga = 20 kPa);
3. Acesso ferroviário: $\Delta h \approx 3,8 \text{ m}$ (sobrecarga = 50 kPa).

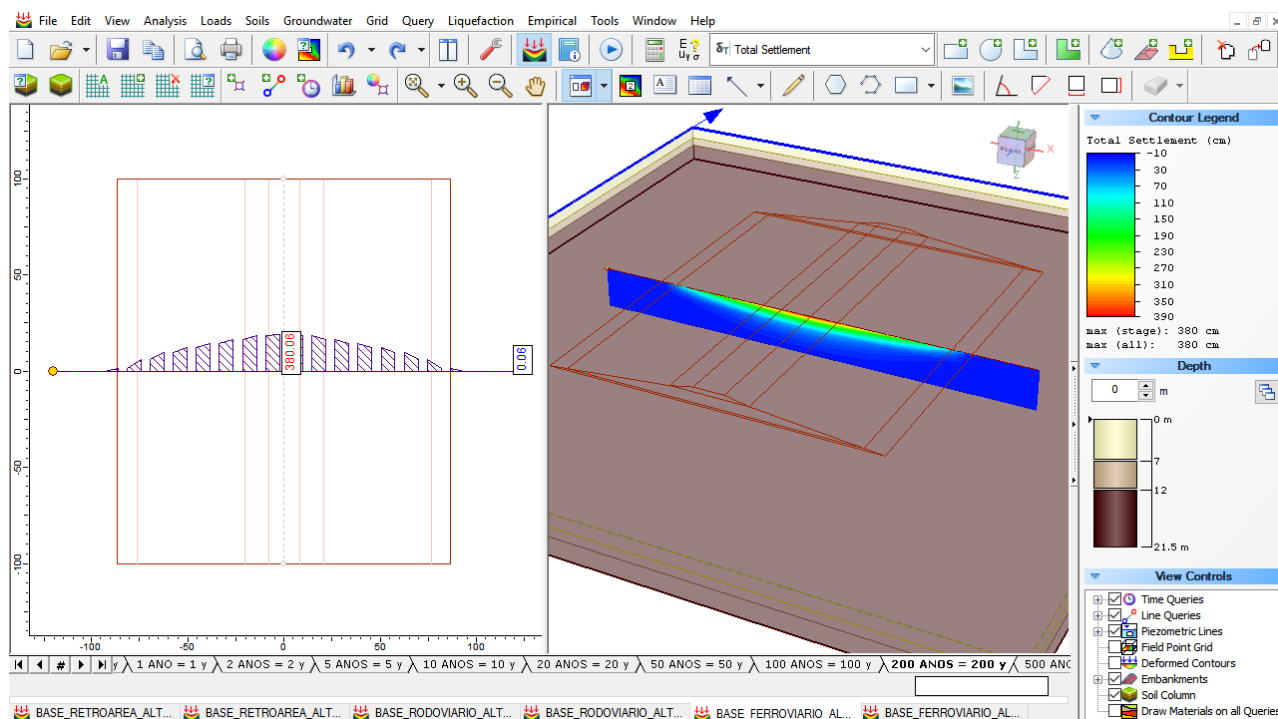


Figura 4. Interface do software Settle3D na análise de recalque primário sem uso de drenos.

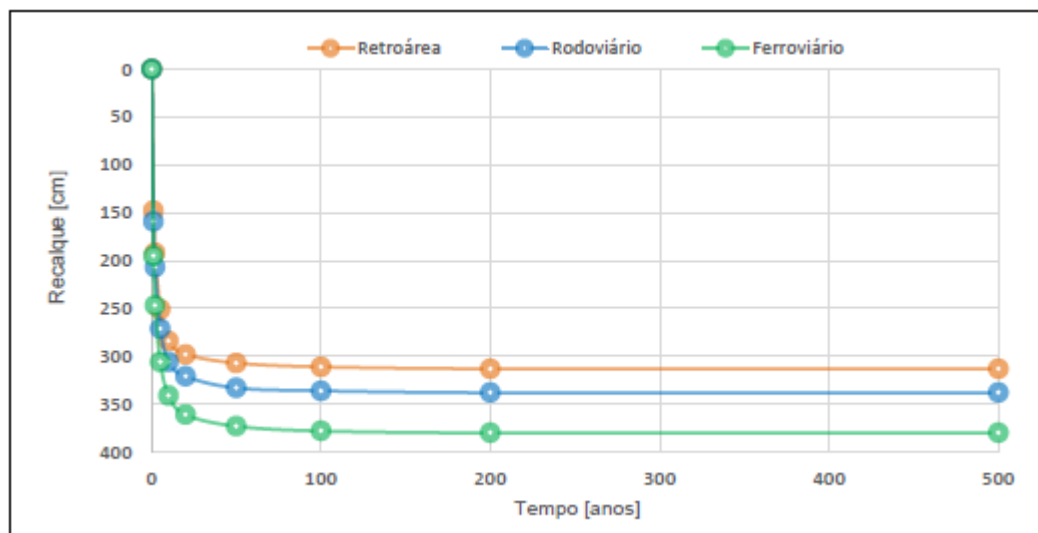


Figura 5. Estimativa de recalque por adensamento primário após processo de iteração no software Settle3D.

Desta forma, a cota da crista do aterro, incluindo as sobrecargas de projeto e desconsiderando a evolução dos recalques é de: +12,1 m (retroárea), +13,4 m (rodovia) e +15,3 m (ferrovia). Desenhos esquemáticos da conformação final dos aterros são apresentados entre a Figura 6 e a Figura 8.

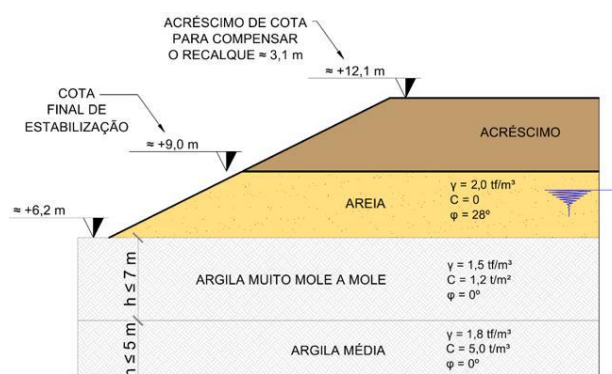


Figura 6. Desenho esquemático da conformação do aterro para a retroárea.

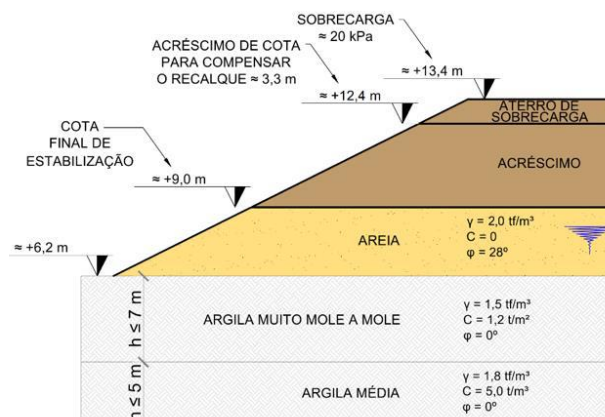


Figura 7. Desenho esquemático da conformação do aterro para o acesso rodoviário.

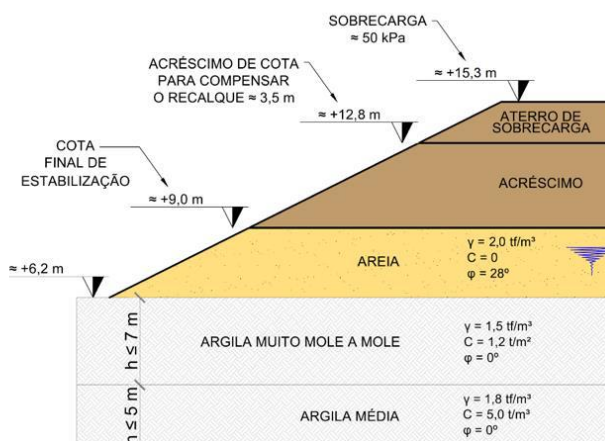


Figura 8. Desenho esquemático da conformação do aterro para o acesso ferroviário.



O processo de adensamento do solo está associado ao alívio da sobre pressão dos poros, que se dá de forma relativamente lenta em argilas pouco permeáveis. O tempo necessário para que ocorra 95% do recalque por adensamento primário também foi calculado utilizando o programa Settle3D. As estimativas de tempo para estabilização dos recalques são da ordem de:

1. Retroárea: $t \approx 20,7$ anos
2. Acesso rodoviário: $t \approx 20,4$ anos
3. Acesso ferroviário: $t \approx 21,6$ anos

Os tempos calculados são incompatíveis com os prazos da obra. Assim, pode-se concluir que para fins práticos do projeto do aterro, é necessário empregar técnicas que permitam acelerar os recalques. Embora a sobrecarga tenha um efeito importante na aceleração dos recalques, sem uma medida adicional (como seria o caso de drenos verticais) a sobrecarga não é suficiente para atender as condições do projeto.

6 CONCLUSÃO

Os projetos geotécnicos envolvem algumas incertezas, principalmente no que diz respeito à correta representação das camadas devido à heterogeneidade dos solos.

Nas obras de aterros rodoviários e ferroviários, tema deste trabalho, os solos moles são altamente indesejáveis nas fundações, tendo em vista que são muito compressíveis e com baixa resistência ao cisalhamento, e podem acarretar em elevados recalques e em ruptura de fundação, comprometendo o orçamento e cronograma da obra, além da solução técnica adotada.

No presente trabalho, foram abordadas as metodologias de cálculo da magnitude dos recalques e sua variação no tempo, num

problema de solos moles, incluindo a estimativa do recalque por compressão secundária. Foram efetuados cálculos empregando técnicas de aceleração de recalques (geodrenos e sobrecarga) a fim de conhecer os efeitos destas técnicas no comportamento em termos de recalques do aterro.

Efetivamente uma combinação de sobrecarga com geodrenos adequadamente dimensionados com base em recomendações provenientes da experiência e de fontes bibliográficas, faz com que possa ser atingido o recalque (primário + secundário) conforme as premissas de projeto.

As análises de estabilidade contemplaram soluções usuais e consagradas na prática de engenharia, onde conjunto de soluções empregado atingiu o fator de segurança requerido por norma, certificando os acessos às cargas de utilização impostas. Não ocorrerá ruptura durante o lançamento do aterro, uma vez que o FS calculado é maior que o FS mínimo de projeto (1,3). Ainda, a medida que o aterro é lançado melhora-se a densidade e a coesão da argila muito mole, implicando no aumento no valor do FS calculado.

No entanto, as alternativas testadas resultaram em taludes consideravelmente grandes, resultando em elevados volumes de aterro. Assim, recomenda-se a revisão das alternativas testadas de forma a incluir uma opção com bermas de equilíbrio, e/ou adoção de geogrelhas mais resistentes, visando uma possível redução destes volumes.

Com base no que foi apresentado ao longo do trabalho, tem-se expostas as seguintes considerações:

- Para detalhar qualquer das alternativas acima estudadas deve-se prever uma campanha de investigação geotécnica específica, já que a base de dados disponível não é suficientemente abrangente e se encontra fora da área ocupada pelas pistas rodoviárias e ferroviárias;
- Para o detalhamento, também é



importante a realização de levantamento topográfico ao longo do terreno, de forma a permitir a criação de perfis geológicos típicos para cada um dos aterros. A partir de perfis representativos, pode-se efetivamente realizar a análise espacial em três dimensões, refinando consideravelmente a análise;

- Conforme foi apresentado ao longo do trabalho, o tempo requerido para uma determinada percentagem de recalque por adensamento primário varia principalmente em função do coeficiente de consolidação vertical. Este parâmetro é normalmente obtido em amostras ensaiadas em laboratório, e os resultados de laboratório podem acabar por fornecer valores bem inferiores ao real, principalmente se houverem lentes de areia no maciço da argila muito mole. Por esta razão em obras do porte como esta, recomenda-se a realização de aterros experimentais a fim de obter, com maior precisão, este parâmetro. Isto poderá resultar em ganhos expressivos de prazo no tempo necessário para obter a estabilização do aterro. Além disso, nesse aterro experimental pode-se verificar a influência do espaçamento entre os drenos o que resultará em se fazer uma melhor avaliação de custo e tempo a empregar nesse serviço;
- Sugere-se a realização de estudo de alternativas de drenagem do terreno para avaliar a possibilidade de redução da cota de inundação e da cota final do aterro do TPM, diminuindo a quantidade de material de aterro, custos e prazos de construção;
- Em etapa de pré-execução da obra, deve-se planejar a instrumentação de forma a garantir que os recalques previstos em projeto foram atingidos e que a estabilidade está em acordo com os

parâmetros de projeto.

Concluiu-se que, todas as alternativas estudadas atenderam os parâmetros técnicos de desempenho e segurança recomendados na bibliografia pesquisada e requeridos em projeto, assim sendo, a escolha da alternativa recai apenas sobre a análise econômica, que tem como principal dependente o custo do m³ de aterro mecânico.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M.S.S.; Marques, M.E.S. Aterros sobre solos moles. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- Oliveira, H.M.; Almeida, M.S.S. In: Vertematti, J.C. (Coord.). Manual brasileiro de geossintéticos. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2004. Cap. 10, p. 275-294.
- Futai, M.M.. Considerações sobre a influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles. 2010. 197 f. Tese de Livre Docência (Departamento de Estruturas e Geotecnia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- Palmeira, E.M.; Ortigão, A.. In: Vertematti, J.C. (Coord.). Manual brasileiro de geossintéticos. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2004. Cap. 4, p. 72-83
- Teixeira, S.G.; Souza Filho, P.W.M. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. Revista Brasileira de Geofísica. v. 27 supl. 1: São Paulo, 2009.