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/COBRAMSEG2026.4/27

Aterro sobre solos moles: Estudo de Caso em Biguaçu/SC

Gabriela Menghini de Godoy
Mestranda, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, gabriela.godoy@posgrad.ufsc.br

Gracieli Dienstmann
Professora, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@ufsc.br

Jonatas Sosnoski
Engenheiro civil, Geoforma, Joinville, Brasil, jonatas.sosnoski@gmail.com

André Luis Meier
Doutorando, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, de.luis.meier@gmail.com

Graziele Moura Borges Silva
Graduanda, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, grazielemourab@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta a avaliação geotécnica para implantação de aterros com altura aproximada de 3,2 m sobre solos moles em área costeira de Biguaçu/SC. A investigação de campo incluiu sondagens SPT, seis ensaios de piezocone (CPTu) com dissipação e a coleta de amostras indeformadas para ensaios de caracterização e adensamento. Os resultados indicaram a presença de camadas de argilas moles a muito moles, com espessuras entre 2,0 m e 7,0 m, resistências não drenadas médias entre 15 e 25 kPa e elevados índices de compressibilidade. A estimativa de recalques, realizada pelo método de Janbu, indicou valores entre 20 cm e superiores a 90 cm nos trechos mais críticos. A análise do tempo de consolidação mostrou que, sem tratamento, seriam necessários até 45 meses para atingir cerca de 90% do adensamento, enquanto a adoção de geodrenos em malha triangular com espaçamento de 1,30 m reduziu esse tempo para aproximadamente 3 a 4 meses. As verificações de estabilidade e de expulsão lateral (*squeeze*) evidenciaram fatores de segurança insuficientes na condição sem reforço. Como solução, recomenda-se a combinação de geodrenos, reforço basal com geogrelhas e instrumentação geotécnica, visando à redução dos recalques, aceleração do adensamento e garantia da estabilidade dos aterros.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro sobre solos moles, Pré-carregamento, Geodrenos, CPTu, Estabilidade.

ABSTRACT: This paper presents the geotechnical assessment for the construction of embankments with an approximate height of 3.2 m over soft soils in a coastal area of Biguaçu, Santa Catarina State, Brazil. The field investigation comprised SPT soundings, six piezocone penetration tests (CPTu) with dissipation tests, and the collection of undisturbed samples for laboratory characterization and consolidation tests. The results indicated the presence of soft to very soft clay layers with thicknesses ranging from 2.0 m to 7.0 m, average undrained shear strengths between 15 and 25 kPa, and high compressibility. Settlement prediction performed using Janbu's method yielded values between 20 cm and more than 90 cm in the most critical sections. Consolidation time analyses showed that, without ground improvement, approximately 45 months would be required to achieve about 90% consolidation, whereas the installation of prefabricated vertical drains arranged in a triangular pattern with 1.30 m spacing reduced this period to approximately 3 to 4 months. Stability and lateral squeezing analyses indicated insufficient safety factors under untreated conditions. As a result, a combined solution involving prefabricated vertical drains, basal reinforcement with geogrids, and geotechnical instrumentation is recommended to reduce settlements, accelerate consolidation, and ensure embankment stability.

KEYWORDS: Embankment on soft soils; Preloading; Vertical drains; CPTu; Stability.

1 INTRODUÇÃO

A execução de aterros sobre solos moles constitui um dos principais desafios da engenharia geotécnica, especialmente em áreas costeiras formadas por depósitos recentes, caracterizados por baixa resistência ao cisalhamento e elevada compressibilidade. Solos com baixa resistência ao cisalhamento e elevada compressibilidade tendem a apresentar recalques significativos, longos tempos de adensamento e dificuldades de estabilidade durante a fase construtiva, quando submetidos a carregamentos de aterros (Almeida e Marques, 2010).

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um estudo de caso de aterros sobre solos moles em área costeira do município de Biguaçu/SC, com base em investigações geotécnicas de campo e laboratório. São avaliados os recalques, os tempos de adensamento e a estabilidade dos aterros, bem como analisadas soluções de melhoria do subsolo, visando subsidiar o projeto geotécnico e a tomada de decisão quanto às medidas mais adequadas para a execução segura da obra. Por questões de confidencialidade, localização exata, nome de empreendimento entre outros foram descaracterizados ao longo da apresentação do artigo.

2 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO E LABORATÓRIO

As sondagens à percussão (SPT) realizadas em 2020 indicaram a presença de camadas superficiais de argilas muito moles a moles, com espessuras variando entre 2,5 m e 5,0 m, assentadas sobre solos arenosos de compacidade fofa a média. Essa configuração caracteriza a ocorrência de solos compressíveis, suscetíveis a recalques significativos quando submetidos aos carregamentos dos aterros de projeto.

Com o objetivo de complementar a investigação, foram executados seis ensaios de piezocone (CPTu) ao longo do traçado, Figura 1, incluindo ensaios de dissipação, além da coleta de amostras indeformadas do tipo *Shelby* nos pontos 02, 04, 05 e 06, nas profundidades de 1,5 m, 4,0 m, 4,0 m e 3,8 m, respectivamente. Ensaios laboratoriais de caracterização e adensamento confirmaram a natureza argilosa e compressível dos depósitos superficiais, Tabela 1.

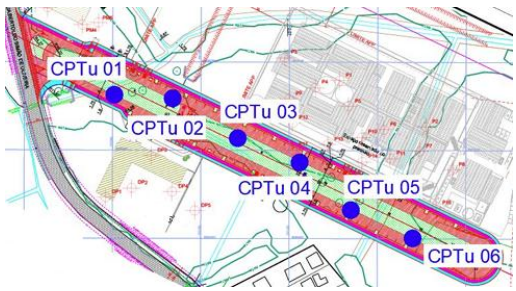


Figura 1. Localização dos pontos de ensaio CPTu ao longo do traçado.

A partir da integração dos resultados das sondagens SPT, dos ensaios CPTu e dos ensaios laboratoriais, foi elaborado o perfil geotécnico do terreno, apresentado na Figura 2, no qual se observa a presença local de camada superficial de aterro, seguida por solos orgânicos/argilosos de baixa resistência, estendendo-se até profundidades variáveis. Em alguns trechos extremos e intermediários, ocorrem solos arenosos e siltosos com maior resistência, indicando melhor comportamento.

Adicionalmente, os resultados dos ensaios CPTu permitiram estimar a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u). Para a sua determinação, adotou-se Nkt = 12, calibrado com base em ensaios locais e experiência regional, resultando em valores médios entre 15 e 25 kPa (Figura 3).

Referência	CPTu 2	CPTu 4	CPTu 5	CPTu 6
Amostra	AM 02	AM 04	AM 05	AM 06
Prof. (m)	1,5	4,0	4,0	3,8
Índice vazios inicial	0,97	2,83	3,46	0,97
Índice compressão	0,25	1,14	1,45	0,25
Tensão pré-adensamento (kPa)	34	27	30	45
LL	45	63	64	50
LP	26	40	47	30
IP	19	23	17	20

Tabela 1. Resumo ensaios de adensamento e limites de Atterberg.

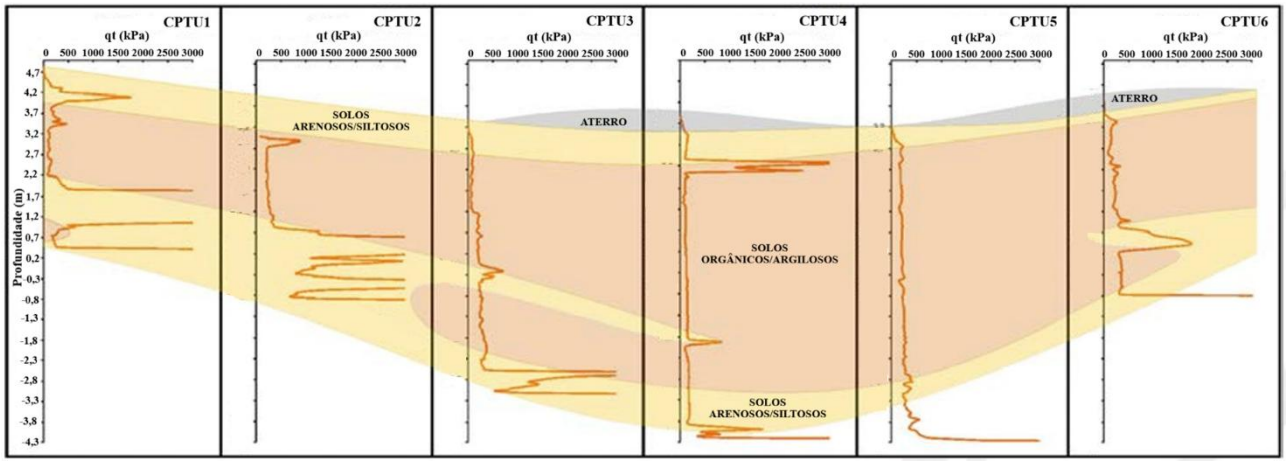


Figura 2. Perfil geotécnico com base nas sondagens CPTu.

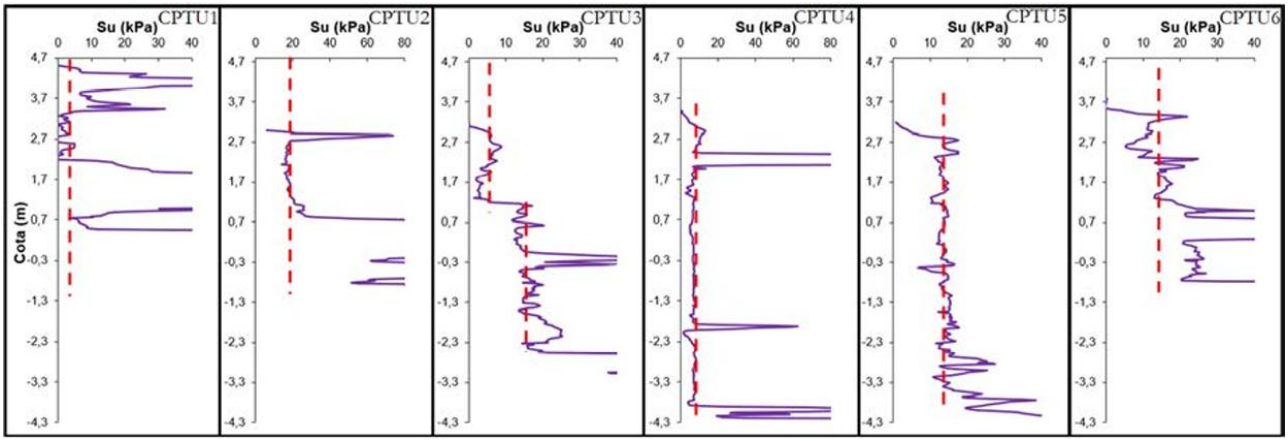


Figura 3. Resultado da interpretação da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) do solo de fundação.

3 ESTIMATIVA DE RECALQUES

A área de estudo situa-se em ambiente costeiro associado à baía de Biguaçu, constituído por sedimentos quaternários recentes (aluviões e depósitos de mangue) sobre o embasamento gnáissico, com elevada presença de matéria orgânica. Esses depósitos encontram-se, em geral, em condição normalmente adensada, apresentando baixa resistência e elevada deformabilidade.

A estimativa de recalques foi realizada pelo método proposto por Janbu (CFEM, 1992 eds. 2006/2019). A deformação de cada camada foi calculada considerando os domínios de recompressão ($\sigma'_1 < \sigma'_p$) e compressão virgem ($\sigma'_1 > \sigma'_p$), conforme equação 1.

$$\varepsilon = \begin{cases} m_r . \ln\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}\right) \\ m_r . \ln\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}\right) + m . \ln\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_p}\right) \end{cases} \quad (1)$$

Onde m_r é o coeficiente de recompessão elástica, m é o coeficiente de compressão plástica, σ'_p a tensão de pré-adensamento, σ'_0 a tensão vertical atual, e σ'_1 a tensão final a aplicar.

O recalque total (S) é obtido somando-se as contribuições de cada camada H_i. Os parâmetros de compressibilidade foram definidos a partir dos ensaios de adensamento em laboratório, enquanto a tensão de pré-adensamento foi estimada a partir dos resultados dos ensaios CPTu.

$$S = \sum \varepsilon_i . H_i \quad (2)$$

As tensões incrementais impostas pelo aterro foram estimadas considerando altura de aterro de, aproximadamente, 3,2 metros nos trechos críticos e peso específico do material de empréstimo igual a 20 kN/m³. Com base nessas informações, os recalques foram avaliados para as posições correspondentes aos ensaios CPTu 01 a 06, permitindo a construção do perfil longitudinal de deformações.

A distribuição dos recalques ao longo do traçado (Figura 4) indica valores entre 20 e 25 cm nas estacas 1 a 4, reduzindo para cerca de 10 cm entre as estacas 5 e 6. A partir da estaca 7, observa-se aumento significativo, com valores superiores a 90 cm entre as estacas 8 e 10, associados à maior espessura das camadas argilosas. Nos trechos finais, os recalques reduzem gradualmente, atingindo aproximadamente 30 cm.

Os resultados indicam a necessidade de setorização do projeto, com adoção de soluções de melhoria de solo nos trechos mais críticos, como pré-carregamento associado a geodrenos.

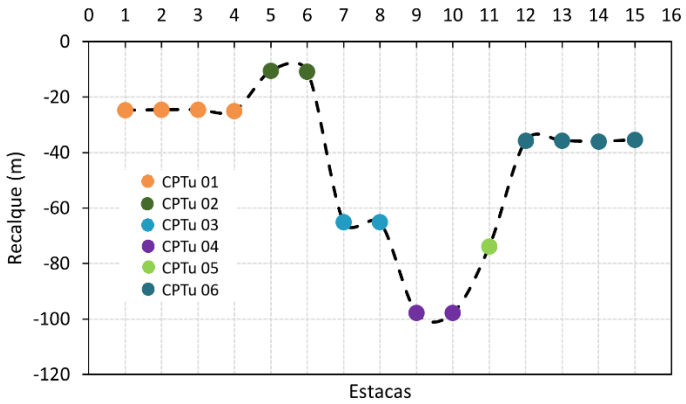


Figura 4. Estimativa de magnitude dos recalques ao longo do projeto.

4 ESTIMATIVA DO TEMPO DE ADENSAMENTO

A avaliação do tempo necessário para a dissipação das poropressões e a consolidação das camadas argilosas foi realizada a partir da determinação do coeficiente de adensamento (c_v). Para essa finalidade, foram considerados dois conjuntos principais de dados: os ensaios de dissipação realizados nos piezocones (CPTu) e os ensaios de adensamento.

Os resultados indicam que os valores de c_v (entre 0,0004 e 0,0038 cm²/s) variam significativamente em função da profundidade e da posição ao longo do traçado, o que implica tempos de adensamento distintos para os diferentes trechos do empreendimento. O tempo necessário para atingir aproximadamente 90% do recalque primário foi estimado pela equação 3.

$$t = T_v.\frac{H^2 d}{cv} \qquad (3)$$

(a) Estimativa tempo de recalque

(b) Evolução do adensamento ao longo do tempo

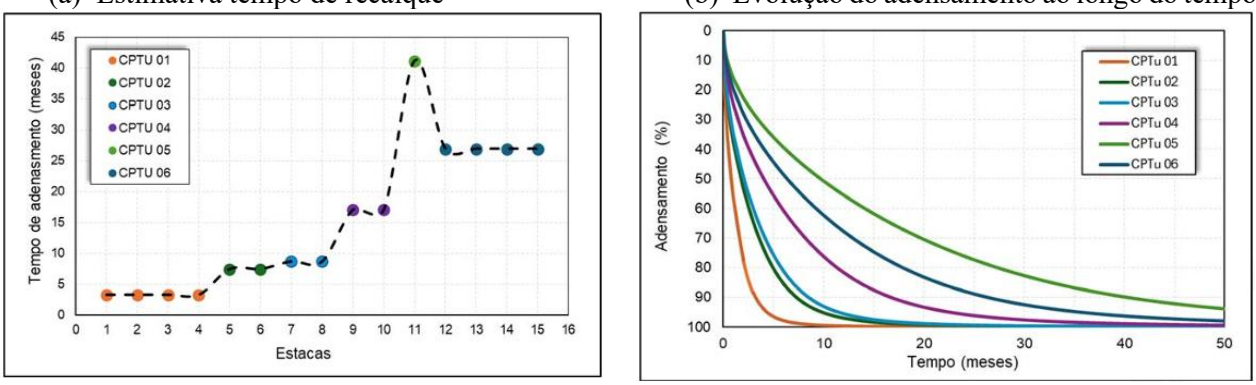


Figura 5. Estimativa do tempo de recalque e evolução do adensamento com o tempo.

A estimativa do tempo de adensamento ao longo do eixo do projeto, associada às posições das estacas e aos ensaios CPTu, é apresentada na Figura 5. Observa-se que, nos trechos correspondentes aos CPTu 01 e 02, caracterizados por menor espessura de solo mole, os tempos de adensamento situam-se entre 2 e 5 meses. Em contrapartida, nos trechos associados ao CPTu 05, os valores ultrapassam 40 meses. Além disso, a Figura 5 também apresenta a evolução do grau de adensamento ao longo do tempo para os diferentes pontos investigados. Nos locais com solos mais permeáveis e de menor espessura, o adensamento atinge rapidamente

valores próximos a 90% em poucos meses. Já nos trechos mais espessos e menos permeáveis, o processo é significativamente mais lento, podendo demandar períodos superiores a décadas para alcançar graus semelhantes de consolidação.

Os resultados indicam grande variabilidade ao longo do traçado, com condições mais críticas nos trechos associados aos CPTu 04 a 06, justificando a adoção de medidas de aceleração de recalques, como a utilização de drenagem vertical.

5 EXPULSÃO LATERAL DE SOLOS MOLES (*SQUEEZE*)

Durante a execução de aterros sobre solos moles, pode ocorrer o fenômeno de *squeeze*, caracterizado pela expulsão lateral do solo em função da baixa resistência não drenada e do incremento de tensões induzido pelo aterro, podendo resultar em deformações excessivas e instabilidades.

A verificação da estabilidade frente à expulsão lateral foi realizada por meio da equação 4. A equação proposta determina um um fator de segurança (Fe) considerando uma geometria adotada para o projeto de terraplanagem, com taludes do aterro com inclinação de 1V:2H.

$$Fe = \frac{(0{,}5.\gamma_f.D+2.S_u).D+(\alpha.S_{u0}+S_{ub}).n.H}{(\gamma.H+q+0{,}5.\gamma_f.D-2.S_u).D} \quad (4)$$

Onde γ_f é o peso específico do solo mole, D espessura da camada mole, α graus de mobilização da resistência não drenada no topo da interface solo/aterro, S_{u0} resistência ao cisalhamento no topo da base da camada mole, S_{ub} resistência ao cisalhamento na base da camada mole, S_u resistência ao cisalhamento média na camada mole, n fator de inclinação do aterro, H altura do aterro, γ peso específico do aterro, e q a sobrecarga.

As análises indicaram valores médios de Fe ≈ 1,2, inferiores ao recomendado para a fase construtiva. Para atender a um fator de segurança mínimo de 1,3, recomenda-se a adoção de taludes mais suaves (1V:3H). Essa medida aumenta a estabilidade inicial e tende a se tornar mais favorável com o tempo, devido ao ganho de resistência associado ao adensamento.

6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS TALUDES

De acordo com a ABNT NBR 11682 (2009), considerando níveis elevados de risco associado à perda de vidas humanas e a danos materiais e ambientais, o fator de segurança mínimo recomendado para a obra é FS=1,5. As análises de estabilidade foram realizadas para seções transversais representativas das condições mais críticas do projeto, correspondentes às estacas 7 e 13. As análises foram conduzidas considerando a inclinação de talude de 1V:3H. Os resultados obtidos para as seções correspondentes às estacas 7 e 13 são apresentadas na Figura 6, com conjunto de parâmetros adotados expresso nas Tabela 2 e 3.

Os fatores de segurança obtidos situaram-se entre 0,87 e 1,0, portanto inferiores ao valor mínimo recomendado de 1,5. Esses resultados indicam que, mesmo com a adoção de taludes mais suaves, a estabilidade global não é atendida, evidenciando a necessidade de medidas adicionais de reforço na base do aterro para garantir condições adequadas de segurança.

Estaca 07				Estaca 13			
Camada	**z (m)**	**γ**	**Parâmetros**	**Camada**	**z (m)**	**γ (kN/m³)**	**Parâmetros**
Aterro	-	16	c'=5; φ'=28°	Aterro	-	16	c'=5; φ'=28°
Rachão	-	20	c'=1; φ'=35°	Rachão	-	20	c'=1; φ'=35°
Argila	0–2	14	Su=5	Argila	0–1	14	Su=10
Argila	2–3	14	Su=8	Argila	1–2	14	Su=5
Argila	3–4	14	Su=12	Argila	2–3	14	Su=12
Argila	4–5	14	Su=10	Argila	3–3,5	14	Su=40
Argila	5–6	15	Su=20	Argila	3,5–4,5	14	Su=15
Residual	-	18	c'=10; φ'=30°	Residual	-	18	c'=10; φ'=30°

Tabela 2. Parâmetros do solo.

Reforço	Aderência (kPa)	φ (°)	Modelo	Orientação	Ancoragem	Cobertura (%)	T (kN/m)
Geogrelha	2	35	Linear	Paralela	Face do talude	100	200

Tabela 3. Parâmetros da geogrelha.

(a) Estaca 07, FS=0,874 (b) Estaca 13, FS=1,001

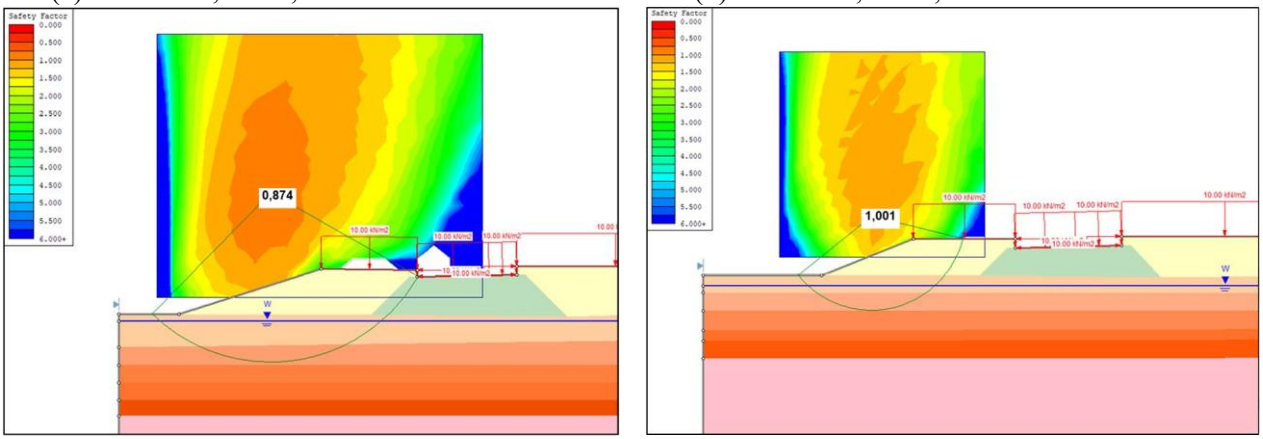


Figura 6. Análise de estabilidade estacas 7 e 13.

7 SOLUÇÕES

A partir da análise integrada de campo e laboratório, bem como da avaliação comparativa das alternativas de melhoria do solo, definiu-se como solução mais adequada a instalação de geodrenos, associada a reforço basal com geogrelhas e ao monitoramento geotécnico por meio de instrumentação (placas de recalque, piezômetros e benchmarks). Essa configuração foi considerada a mais compatível com as condições locais de solo, proporcionando ganhos simultâneos de estabilidade e redução do tempo de consolidação.

7.1 Instalação de geodrenos

A introdução de geodrenos no solo reduz a distância de drenagem, acelerando a dissipação das poropressões e o processo de adensamento. A equivalência entre a drenagem natural e a drenagem induzida por geodrenos foi estimada pela formulação proposta por Carrillo (1942), expressa pela equação 5. As análises foram realizadas considerando geodrenos dispostos em malha triangular, com espaçamento de 1,30m, adotado neste estudo. A comparação entre as condições com geodrenos e sem geodrenos é apresentada na Figura 7.

$$(1 - \overline{U}) = (1 - \overline{U}_v).(1 - \overline{U}_h) \quad (5)$$

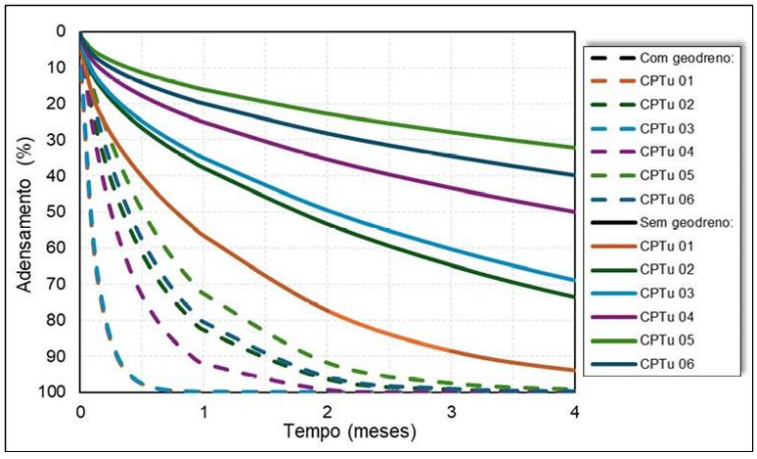


Figura 7. Comparativo da evolução de adensamento com e sem a instalação de geodrenos

Os resultados indicam que a instalação de geodrenos acelera significativamente o adensamento, permitindo atingir graus próximos a 90% em poucos meses, inclusive nos trechos mais críticos. Na ausência de drenos, o processo pode demandar anos para atingir níveis semelhantes.

7.2 Disposição das geogrelhas

As análises previamente realizadas da estabilidade dos aterros indicaram fatores de segurança inferiores a 1,5, em função dos baixos valores de resistência não drenada das camadas de argila mole. Diante desse cenário, tornou-se necessária a adoção de medidas de reforço para garantir a estabilidade global do maciço.

A solução adotada consistiu na instalação de geogrelha na base dos aterros, atuando como elemento tracionado capaz de redistribuir esforços, reduzir deformações diferenciais e elevar os fatores de segurança a níveis compatíveis com os critérios de projeto. Foram realizadas análises considerando uma camada de geogrelha disposta na base do aterro, cujos resultados são apresentados na Figura 8.

Os resultados indicaram fatores de segurança iguais a 1,43 para a seção da estaca 7 e 2,32 para a seção da estaca 13. Para a estaca 7, o valor obtido é considerado adequado para a fase de execução da obra, atendendo aos critérios mínimos de estabilidade de curto prazo. A longo prazo, o processo de adensamento dos solos moles promove aumento progressivo da resistência não drenada, resultando em elevação adicional do fator de segurança.

(a) Estaca 07, FS=1,425 (b) Estaca 13, FS=2,315

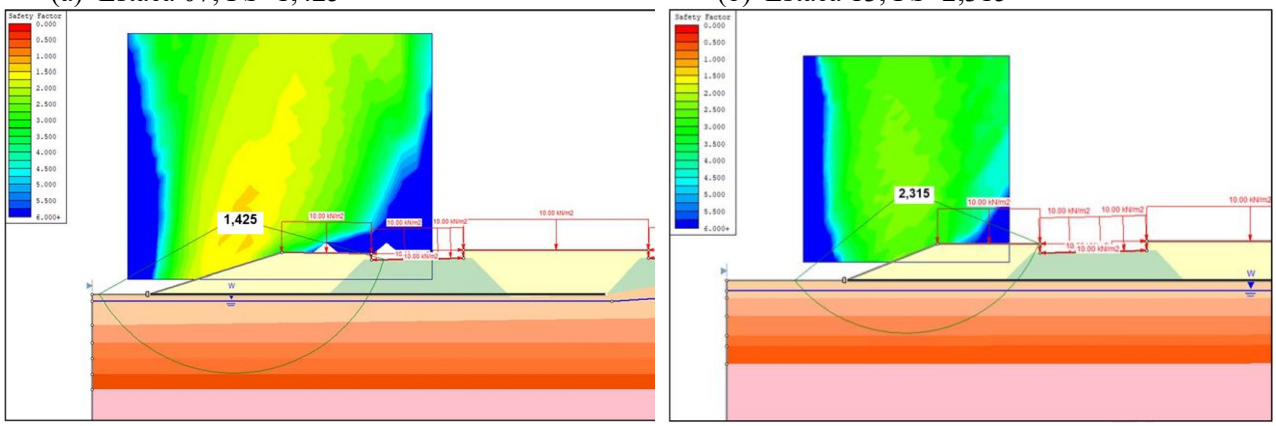


Figura 8. Análise de estabilidade com a disposição de 01 geogrelha nas estacas 7 e 13.

A disposição das geogrelhas deve abranger toda a base do aterro, atuando como elemento de reforço contínuo e assegurando a redistribuição uniforme das tensões. A definição do tipo de geogrelha, do número de camadas e dos comprimentos de ancoragem e deve ser objeto de projeto executivo específico.

7.3 Instrumentação geotécnica

Como parte integrante da solução adotada, foi previsto um sistema de instrumentação geotécnica composto por oito placas de recalque, oito piezômetros e dois *benchmarks*, distribuídos ao longo dos trechos de aterro sobre solos moles. O objetivo do monitoramento é acompanhar a evolução dos recalques e a dissipação das poropressões durante e após a execução do aterro, permitindo avaliar o comportamento real do subsolo e validar as previsões teóricas de adensamento.

As placas de recalque devem ser instaladas na interface entre o aterro e a camada de solo mole, construídas por bases metálicas niveladas e conectadas a hastes de medição topográfica, possibilitando o registro periódico dos recalques acumulados. Os piezômetros devem ser instalados aproximadamente no centro da camada compressível, permitindo o acompanhamento da dissipação das poropressões ao longo do tempo.

Os *benchmarks* devem ser implantados em áreas estáveis, fora da zona de influência dos recalques, e atuarão como pontos fixos de referência para o nivelamento geométrico. Todas as leituras de recalque e poropressão serão referenciadas a esses pontos, garantindo a consistência e a rastreabilidade das medições.

O monitoramento deverá ser contínuo, com leituras mais frequentes nas fases iniciais da obra, da ordem de periodicidade semanal, e com espaçamento progressivo dos intervalos à medida que o solo se estabiliza. A interpretação conjunta dos registros de recalque e de poropressão fornecerá suporte às decisões de campo, como o avanço das etapas de aterro ou a remoção de sobrecarga, assegurando o desempenho previsto no projeto.

Dessa forma, o sistema de instrumentação proposto constitui etapa essencial de controle executivo, contribuindo para a segurança da obra e para a verificação da eficácia das soluções adotadas de melhoria e estabilização do solo.

8 CONCLUSÃO

As investigações geotécnicas realizadas permitiram caracterizar a estratigrafia local e definir os parâmetros necessários às análises de recalque, tempo de adensamento e estabilidade de aterros. Os resultados indicaram a presença de camadas de argilas moles a muito moles, com espessuras variando entre aproximadamente 2,0m e 7,0m, apresentando S_u médio da ordem de 15 a 25kPa e c_v entre 0,0004 e 0,0038 cm²/s, caracterizando um subsolo de elevada compressibilidade e baixa resistência.

As análises de recalque apontaram magnitudes variando entre 25 cm e 100 cm, em função da espessura da camada compressível e da altura do aterro. Nos trechos associados aos CPTu 01 e 02, os recalques previstos situaram-se entre 20 e 30cm, enquanto nas regiões mais críticas, relacionadas aos CPTu 04 e 05, os valores ultrapassaram 90cm.

Quanto ao tempo de consolidação, as estimativas indicaram que, sem a utilização de geodrenos, o tempo necessário para atingir aproximadamente 90% do adensamento pode variar entre 30 e 45 meses nos trechos mais compressíveis. Com a adoção de geodrenos em malha triangular com espaçamento de 1,30 m, esse tempo é reduzido para cerca de 3 a 4 meses.

As análises dec*squeeze* indicaram fatores de segurança médios da ordem de 1,2, inferiores aos valores para a condição de curto prazo. A adoção de taludes com inclinação 1V:3H, associada ao reforço basal com geogrelhas, mostrou-se necessária para reduzir o risco de instabilidade e elevar os fatores de segurança.

As análises de estabilidade global dos aterros indicaram fatores de segurança inferiores a 1,5 na condição sem reforço, tornando necessária a adoção de medidas de estabilização. A solução com geogrelhas resultou em fatores de segurança iguais a 1,43 para a estaca 7 e 2,32 para a estaca 13, considerados adequados para a fase construtiva e a longo prazo, o processo de adensamento tende a aumentar a resistência não drenada.

O sistema de instrumentação geotécnica proposto permitirá o acompanhamento do comportamento real do solo durante a execução dos aterros, possibilitando a verificação do grau de adensamento e subsidiando as decisões de campo quanto à evolução das etapas construtivas.

Por fim, os resultados obtidos fornecem subsídios para o desenvolvimento do projeto executivo, indicando a necessidade de soluções de melhoria do subsolo para garantir a estabilidade e o desempenho dos aterros.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Almeida, M.; Marques, M. E. (2010). *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. São Paulo: Oficina de Textos, 254 p.

Canadian Geotechnical Society (1992). *Canadian Foundation Engineering Manual*. Bitech Publishers, Ottawa. (Edições revisadas: 2006, 2019).

Carrillo, N. (1942). Simple two- and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils. *Journal of Mathematics and Physics*, v. 21, p. 1–5.

Janbu, N. (1960). *Consolidation of clay soils by constant rate of loading*. Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 42.