

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Otécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia



Análise de Estabilidade e de Compressibilidade de uma Obra Sobre Solos Moles

Jade Jacomini de Jesus

Graduanda em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, jade.jacomini@gmail.com

Bianca de Córdova Caetani

Graduanda em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, bibicaetani@gmail.com

Gabriel Fernando Costa

Graduando em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, gabrielf3@gmail.com

Naloan Coutinho Sampa

Professor, UFSC, Florianópolis, Brasil, naloan.sampa@ufsc.br

Paulo Eduardo Obadovski Alves

Engenheiro Civil, CGT Eletrosul - Eletrobras, Florianópolis, Brasil, p.obadovski@gmail.com

RESUMO: Obras de engenharia construídas sobre solos moles demandam cautela e um estudo minucioso a fim de evitar problemas futuros e garantir a segurança da edificação. A partir da interpretação de resultados de investigações geotécnicas – ensaios de caracterização, adensamento, SPT, CPTu e dissipação – realizados em um solo localizado no município de Biguaçu-SC, estabeleceram-se parâmetros que foram utilizados em modelos geomecânicos para a estimativa de recalques ao longo do tempo e verificação da estabilidade em pontos específicos do solo analisado. Para validação dos resultados das estimativas realizadas, foi feita análise numérica da estabilidade do talude e determinação do seu fator de segurança, com auxílio do software *Geo5*, pelos métodos de Fellenius, Bishop, Spencer, Janbu e Morgenstern e Price. Os resultados obtidos e constatações finais feitas servem de base para o planejamento de empreendimento sobre o solo analisado e adoção de medidas de prevenção para problemas geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Moles, Recalque, Análise de Estabilidade, Análise de Compressibilidade, Reforço de Solos, Biguaçu.

ABSTRACT: Engineering constructions build over soft soils demand caution and a detailed study in order to avoid future problems and ensure the security of the building. From interpretation of results of geotechnical investigations – test of characterization, soil densification, SPT, CPTu and dissipation – performed in a soil locate at Biguaçu city, in Santa Catarina, were established parameters used in geomechanical models for estimation of soil settlement over time and verification of stability in specifics points of soil analysed. To validate the results of the estimation made, numerical analysis of the stability of the slope and determination of its safety factor was executed in software *Geo 5*, by methods of Fellenius, Bishop, Spencer, Janbu and Morgenstern & Price. The results obtained and final conclusions support the planning of the project on the soil analyzed and adoption of preventive measures for geotechnical problems.

KEYWORDS: Soft Soils, Settlement, Stability Analysis, Compressibility Analysis, Soil Reinforcement, Biguaçu



1. Introdução

Aterros sobre solos moles se caracterizam por possuir baixa resistência e alta deformabilidade, decorrentes das propriedades geomecânicas e mineralógicas dos solos coesivos, que são altamente compressíveis quando submersos. A caracterização de um solo é feita preliminarmente por análise táctico-visual e complementada por ensaios laboratoriais de amostras coletadas *in situ*, através dos quais pode-se determinar, de forma mais precisa, sua composição física, química e mineral. Além disso, estes ensaios são essenciais na elaboração de modelagens numéricas para previsão mais acurada do comportamento de solos.

O objetivo desse estudo é analisar a estabilidade e compressibilidade de um aterro assente sobre solo composto de uma espessa camada argila siltosa. Para tanto, foi feito o cálculo da previsão de recalques totais ocorrentes no solo e sua evolução temporal, de forma a determinar a compressibilidade e prever possíveis deslocamentos verticais do aterro. A análise de estabilidade foi feita utilizando-se modelos geomecânicos de perfis do solo estudado, a partir dos quais determinaram-se fatores de segurança pelos métodos mais tradicionais da literatura. O estudo feito é de suma importância para engenharia, pois permite a verificação da viabilidade e segurança da implantação de uma obra assente sobre solo compressível.

2. Caracterização do solo

O presente estudo trata da análise de estabilidade do aterro de uma obra localizada no município de Biguaçu, estado de Santa Catarina. A obra foi implantada em uma área de aproximadamente 113.000 m² em um terreno predominantemente plano. O solo da região é caracterizado como solo mole de origem aluvial, tal como grande parte da planície litorânea brasileira. A análise foi feita em uma região da área total do terreno, com aproximadamente 55.000 m² (Figura 1), na qual foram realizados ensaios NSPT, CPTu e Adensamento, através dos quais foi possível verificar a compressibilidade, a estabilidade e realizar a caracterização geotécnica do solo.



Figura 1 - Localização da obra.

Fonte: Autores – Elaborado no software Autocad 2021.

O perfil do solo, na região estudada, varia conforme o ponto ensaiado, entretanto, de forma geral, pode ser caracterizado como composto por uma camada superficial de argila siltosa com espessura variando de 1 metro a 6 metros, conforme local de sondagem, e Nspt majoritariamente baixo (menor que 6). Abaixo da camada de argila siltosa há a predominância de camada de areia siltosa a média siltosa, com Nspt entre 6 e 8, seguida de uma camada de areia grossa (Nspt variando de 10 a 20) em alguns pontos e silte arenoso (Nspt menor que 6) em outros. O início da camada impenetrável também varia conforme o ponto de sondagem, sendo a mais superficial iniciando em 7 metros e a mais profunda a 20 metros.



3. Métodos

Foram realizados no solo em estudo 62 ensaios de sondagem a percussão (SPT), divididos em 5 diferentes campanhas (2005, 2006, 2011, 2015 e 2016), entretanto, para a análise feita na região demarcada foram utilizados somente os ensaios executados na campanha do ano 2005. Além disso, foram realizados ainda 10 ensaios de piezocone (CPTu), 18 ensaios de dissipação da poropressão, efetuados nos mesmos furos dos ensaios de CPTu, além de 8 ensaios de adensamento, executados o mais próximo possível dos ensaios de CPTu. Todos os ensaios de CPTu, dissipação e adensamento foram realizados na região estudada (delimitada na Figura 1), portanto, todos foram utilizados para o estudo que será descrito. Entretanto, foram escolhidos alguns pontos e ensaios para serem estudados com mais profundidade e a partir dos quais traçaram-se perfis do solo para análise numérica em software. Tais pontos foram escolhidos levando-se em conta a proximidade dos quatros diferentes tipos de ensaios realizados, além da consonância entre os perfis de solo obtidos através dos ensaios SPT e CPTu. Desta forma, foram pré-selecionados os pontos que tiveram maior similaridade entre os perfis obtidos pelos diferentes ensaios citados e que tiveram ensaios de dissipação e adensamento realizados em seu entorno. Por fim, optou-se por utilizar 6 pontos que melhor caracterizassem a área total estudada, com os quais foram elaborados perfis de solo e realizados estudos manuais e numéricos mais incisivos. A locação e os ensaios adotados para esses pontos são apresentados nas Tabela 1 e Figura 1 e Figura 2.

Tabela 1 – Pontos analisados e seus ensaios correspondentes.

Ponto	Ensaios realizados		
	SPT	CPTu	Adensamento
1	SP-01 - Campanha 2005	02	F - 08
2	SP-02 - Campanha 2005	04	F - 07
3	SP-04 - Campanha 2005	03	F - 08
4	SP-09 - Campanha 2005	07	F - 04
5	SP-14 - Campanha 2005	08	F - 05
6	SP-17 - Campanha 2005	09	F - 06

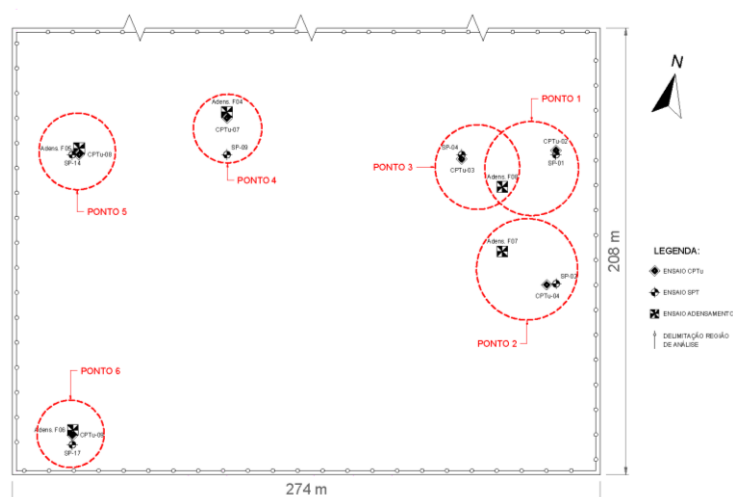


Figura 2 – Locação dos pontos e seus respectivos ensaios.

3.1. Aterro sobre o solo

Para a execução da estrutura sobre a área estudada fora implantado um aterro diretamente sobre a camada de solo mole (argila siltosa), com área de 280 metros por 300 metros, altura variando de 1,50 a 3,0 metros e talude com inclinação de 26,56° (1V:2H). Para sua execução foi utilizado solo argiloso, com peso específico igual a 18,5 kN/m³, ângulo de atrito igual a 10° e coesão de 65 kPa. Os ensaios CPTu realizados,



os quais foram utilizados para desenvolver este estudo, foram executados em julho de 2011, posterior a execução do aterro.

Uma vez que há uma variação de até 1,5 metros na espessura do aterro, para a análise de estabilidade e previsão de recalque utilizaram-se os perfis geotécnicos dos pontos estabelecidos no item 3 e para cada perfil foram feitas duas considerações: Aterro com 1,5 metros de espessura e extensão de 6 metros (4 x espessura) e aterro com 3,0 metros de espessura e extensão de 12 metros (4 x espessura). Dessa forma espera-se obter resultados para o pior e melhor caso, isto é, solo suportando a menor e maior sobrecarga aplicadas. Foram estudados, portanto, 12 perfis de solo, de 6 pontos distintos, e para ambos os perfis a extensão adotada foi de 9 vezes a espessura, conforme ilustrado na Figura 3. Para a análise de estabilidade não foi considerada nenhuma sobrecarga.

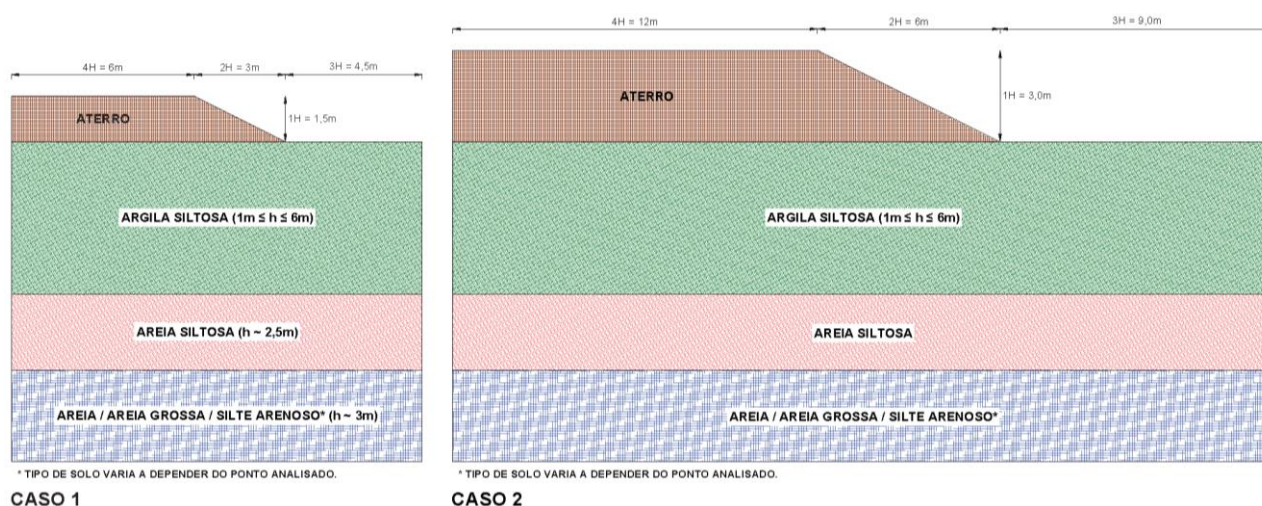


Figura 3 – Geometrias do aterro e perfil típico do solo

3.2. Análise da compressibilidade do solo – Estimativa do recalque

Para a estimativa do recalque e sua evolução com o tempo, foram utilizados os seis perfis de solo, cada um deles com duas condições de sobrecarga: aterro de 1,5 m e de 3,0 m, totalizando 12 análises, conforme detalhado no item 3.1.

A partir do ensaio de adensamento e análise dos resultados obtidos, compilaram-se as informações necessárias para a estimativa do recalque. Para o recalque total, é necessária a determinação do índice de compressão (C_c), o qual fornece a compressibilidade do solo. Já para o tempo de recalque, deve-se determinar o coeficiente de consolidação/adensamento (C_v), o qual indica a velocidade de compressão do solo quando submetido a um incremento de carga.

Desta forma, foram utilizados os seguintes dados e suas respectivas origens: nível da água, extraído dos resultados dos ensaios de CPTu, índice de vazios inicial (e_i), índice de recompressão (C_r), índice de compressão (C_c) e coeficiente de adensamento (C_v), provenientes do cálculo de compressibilidade, realizado a partir dos ensaios de adensamento. Foram consideradas duas faces drenantes: o aterro, que funciona como face drenante, uma vez que não está saturada, e a camada granular sob a camada de argila. A estimativa de recalque foi feita levando em conta a espessura (H_i) até a metade da camada argilosa.

As tensões de pré-adensamento foram determinadas pela soma da sobrecarga causada devido ao aterro com a tensão vertical efetiva inicial de cada caso analisado.

O cálculo foi feito em planilhas automatizadas e foi considerado solo normalmente adensado e pré-adensado. Na condição de pré-adensamento, foram utilizadas duas situações: quando a tensão atuante (σ'_{vf1}) for menor que a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) utiliza-se a equação (1) e quando a tensão atuante (σ'_{vf1}) for maior que a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) utiliza-se a equação (2). Na consideração de solo normalmente adensado, o cálculo de recalque foi realizado pela equação (2).



$$\rho_t = \frac{C_r \times H_i}{(1 + e_i)} \times \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}} \right) \quad (1)$$

$$\rho_t = \frac{H_i}{(1 + e_i)} \times \left(C_r \times \log \left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vi}} \right) + C_c \times \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vm}} \right) \right) \quad (2)$$

$$\rho_t = \frac{C_c \times H_i}{(1 + e_i)} \times \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}} \quad (3)$$

Encontrados os valores de recalque total, fez-se a análise da evolução do recalque com o tempo, dividindo-o em recalque imediato e recalque variável. Para a estimativa do recalque imediato ao longo do tempo, foi utilizada a equação (4), que leva em conta o grau de adensamento U e o recalque total da argila. Já para o recalque variável, no lugar de U , utilizou-se o U' , que é a porcentagem de recalque do carregamento instantâneo para a metade do período de tempo em questão. A análise foi feita para 3 meses, 6 meses, 1 ano, 2 anos, 4 anos, 8 anos e 90 anos.

$$\rho = U \times \rho_t \quad (4)$$

3.3. Análise da estabilidade – Determinação do fator de segurança do talude

A análise da estabilidade do talude foi feita por meio de análise numérica através do software Geo5, que determina o fator de segurança do talude (FS) através de métodos consolidados que têm como base a Teoria do Equilíbrio Limite. Em síntese, essa teoria faz a verificação da estabilidade através do equilíbrio de momentos e forças atuantes no plano de ruptura.

A NBR 11682 – Estabilidade de encostas, determina que o fator de segurança (FS) tem relação direta com a resistência ao cisalhamento do talude. Portanto, um fator de segurança alto indica uma maior segurança contra a ruptura. Segundo a norma, para determinação do fator de segurança deve-se, previamente, classificar o nível de segurança do projeto contra perda de vidas humanas e contra danos materiais e ambientais, para então se determinar o fator de segurança mínimo para deslizamento pretendido para a obra.

O fator de segurança real, por sua vez, é calculado através da equação (5) e deve ser igual ou superior ao fator de segurança mínimo estabelecido em norma.

$$FS = \frac{\text{Tensão máxima cisalhante resistente}}{\text{Tensão cisalhante atuante}} \quad (5)$$

A obra em estudo possui baixo nível de segurança contra danos a vidas humanas e alto nível de segurança contra danos materiais e ambientais. Portanto, segundo a norma, o fator de segurança mínimo para deslizamento é de 1,4.

A verificação da estabilidade foi feita através dos métodos de Fellenius (1927), Bishop (1955), Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967) e Janbu (1968). Embora todos os métodos usados na análise tenham como base a teoria do equilíbrio limite, eles se diferem entre si devido às simplificações adotadas em cada um para o cálculo do fator de determinação da estabilidade. Com a análise pretende-se, além de determinar a estabilidade do talude, apurar as diferenças de resultados entre os métodos.

- Método de Fellenius:

Neste método é estabelecida a hipótese de ruptura em superfície circular. O talude é dividido em fatias independentes entre si e é feita análise no estado plano de tensões. O cálculo do fator de segurança é feito considerando somente o equilíbrio de momentos.

- Método de Bishop:

Este método também define como hipótese a ruptura em superfície circular e divide o talude em fatias. Para a determinação do FS é considerado o equilíbrio dos momentos e das forças verticais e a resultante das forças entre as fatias é horizontal.



- Método de Morgenstern & Price:

Para a determinação do fator de segurança por este método é considerado qualquer tipo de superfície de ruptura e o talude é dividido em fatias infinitesimais. É feito o equilíbrio de forças verticais e horizontais, além do equilíbrio de momentos. Trata-se de um método com cálculo mais complexo, demanda cálculos iterativos e para ser executado faz-se necessário o uso de análise numérica.

- Método de Spencer:

Método inicialmente desenvolvido para superfícies de ruptura circulares e posteriormente adaptado para outros tipos de superfície (FABRÍCIO, 2006). Trata-se de um método mais rigoroso que os métodos simplificados que consideram o equilíbrio de forças e momentos.

- Método de Janbu:

Este método baseia-se no equilíbrio de forças e momentos e pode ser usado para superfícies de ruptura circulares e não circulares e é considerada a hipótese de que a posição da força normal entre as fatias do aterro é definida por uma linha de empuxo arbitrária.

4. Resultados

As estimativas de recalque encontradas para cada caso foram compiladas em dois gráficos que relacionam recalque instantâneo *versus* tempo, ambos em escala logarítmica, sendo em um deles apresentadas as deformações em metros e no outro os valores de recalque em porcentagem durante os anos analisados. Como há duas condições de aterro, de 1,5 m e 3 m, foram plotados, no total, quatro gráficos, os quais são apresentados na Figura 4 e na Figura 5.

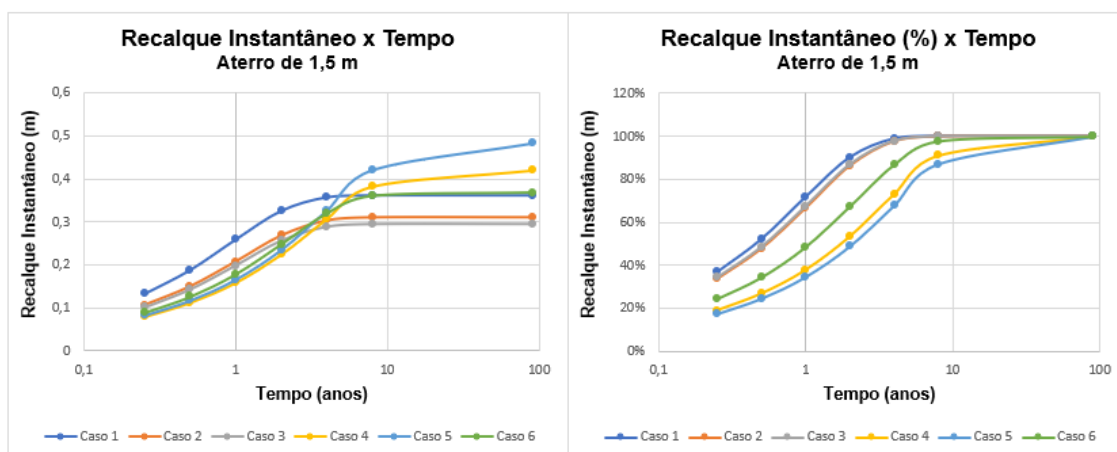


Figura 4. Gráficos estimativa do recalque para a condição de aterro de 3 m em escala logarítmica

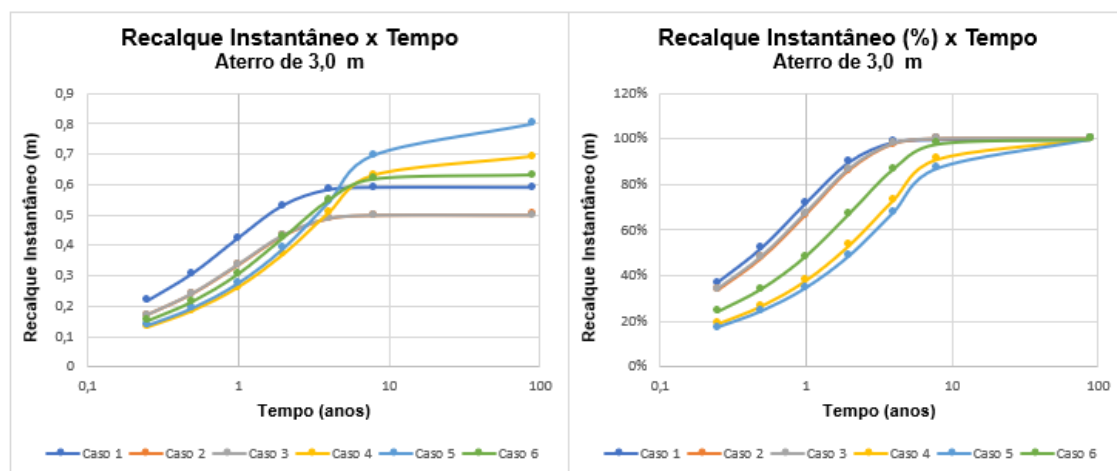


Figura 5. Gráficos estimativa do recalque para a condição de aterro de 3 m em escala logarítmica



A análise de estabilidade do talude, realizada no software Geo5, teve como resultados os fatores de segurança (FS), para os diferentes métodos testados. Foram feitas análises considerando superfícies de ruptura circular e de ruptura poligonal, os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3. Todos os FS obtidos são superiores a 1,4, mínimo exigido pela normativa brasileira para a edificação em estudo. Entretanto, observa-se que o FS obtido para a superfície de ruptura poligonal do perfil de solo do ponto 2, com aterro de espessura igual 3,0m, é bem próximo ao mínimo estabelecido, demandando atenção.

Tabela 2 – FS obtidos no Geo5 – Superfície de ruptura circular.

SUPERFÍCIE CIRCULAR						
Espessura de aterro	Ponto Analisado	Método de Fellenius	Método de Bishop	Método de Morgenstern & Price	Método de Spencer	Método de Janbu
				FS		
1,5m	1	5,84	5,76	6,94	6,94	6,93
	2	3,2	3,14	3,21	7,3	3,21
	3	5,1	5,09	5,12	5,12	5,12
	4	4,91	4,89	4,93	5,13	4,94
	5	5,42	5,34	5,64	7,2	5,66
	6	4,52	4,5	4,54	5	4,54
3,0m	1	3,72	3,73	3,74	3,74	3,74
	2	1,88	1,80	1,88	2,43	1,88
	3	2,76	2,75	2,79	2,79	2,79
	4	2,91	2,86	2,91	3,1	2,91
	5	3,74	3,68	3,99	4,28	3,99
	6	2,5	2,47	2,52	2,61	2,52

Tabela 3 – FS obtidos no software Geo 5 – Superfície de ruptura poligonal

Espessura de aterro	Método de Morgenstern & Price	Método de Spencer	Método de Janbu
	FS		
1,5m	4,74	Sup. Não Encontrada	4,72
	5,29	6,34	5,84
	3,86	Sup. Não Encontrada	3,86
	3,01	4,18	3,66
	3,92	Sup. Não Encontrada	5,34
	2,91	3,99	2,29
3,0m	2,81	2,8	2,81
	1,43	Sup. Não Encontrada	1,43
	2,07	2,18	2,07
	1,63	2,94	2,07
	2,93	3,78	3,33
	2,07	2,26	1,68

5. Conclusões

Os recalques obtidos nos casos em que a condição de aterro foi de 1,5 m foram significativamente menores que os de aterro de 3 m, resultado já esperado, pois os aterros mais altos consequentemente provocam uma sobrecarga com o dobro do valor da sobrecarga dos aterros de 1,5 m de altura. Comparando-se os seis casos entre si, verificou-se que o caso 1 foi o que resultou nos maiores valores de deformação, isso



corroborar a teoria de que quanto mais espessa for a camada de argila do solo, maiores serão os recalques sofridos, pois solos moles estão mais sujeitos aos efeitos do adensamento e da compressibilidade do que solos granulares.

Também foi constatado que nos anos iniciais as deformações são mais expressivas, assim à medida que o tempo passa, o solo tende a adensar menos e permanecer mais estável, tal resultado reforça a importância do acompanhamento do adensamento nos primeiros anos após a construção de um aterro.

De posse dos resultados obtidos, através de modelagem numérica, para a análise de estabilidade do talude dos diversos perfis verificados, pode-se constatar que, embora o solo seja composto por uma espessa camada de solo mole, o talude é mecanicamente estável. Entretanto, ressalta-se que a análise foi feita considerando as condições ideais de carga e clima. Portanto, caso o aterro estudado seja submetido a uma sobrecarga acima da prevista em projeto, ou o local seja exposto a altos volumes pluviométricos, que provocariam a saturação total do solo, e consequente aumento do peso específico do talude, a análise feita não pode mais ser considerada. Ademais, para a conclusão aqui posta, foram analisados apenas alguns perfis específicos onde foram realizados os ensaios mencionados anteriormente. Portanto, para que se chegue a uma conclusão precisa da estabilidade do aterro executado na obra, recomenda-se que sejam realizados e analisados ensaios em mais pontos, de modo a abranger uma região mais representativa da área total do aterro. Além disso, embora estável em uma análise preliminar, técnicas executivas poderiam ter sido adotadas na instalação do aterro, tais como adoção de manta geossintética entre o solo natural e o aterro, instalação de drenos verticais para acelerar o processo de recalque e utilização de material com menor teor de partículas finas para a execução do aterro. Tais técnicas garantiriam a sua estabilidade e segurança global, além de aumentar sua capacidade de suporte.

Ainda através dos ensaios de estabilidade realizados, percebe-se uma variação nos valores de FS, decorrente da simplificação e das hipóteses adotadas para cada método. Os métodos de Fellenius e Bishop, em geral, apresentaram FS menores comparados aos demais métodos. Isso deve-se ao fato de esses métodos possuírem cálculos mais simplificados, resultando em fatores de segurança mais conservadores.

O estudo realizado é de suma importância para a engenharia, uma vez que serve de parâmetro para obras futuras realizadas na região. As conclusões extraídas das análises feitas demonstram a importância de um estudo preliminar minucioso e responsável, principalmente quando se trata de solos moles. Além de garantir a segurança do empreendimento e propiciar a adoção de medidas e técnicas mais adequadas, uma investigação geotécnica bem feita representa economia, uma vez que a previsão de problemas pressupõe a adoção de medidas preventivas e evita medidas corretivas, que costumam ser mais custosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR. Norma Brasileira. Rio de Janeiro, RJ, p. 1-33

DOMINONI, C. M. B. ANÁLISE DE ESTABILIDADE E COMPRESSIBILIDADE DE UM ATERRO SOBRE SOLO MOLE NO PORTO DE SUAPE, REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE. Projeto de Graduação – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufjf.br/monografias/monopoli10006703.pdf>>. Acesso em: 13 Dec. 2021.

FABRÍCIO, João Vicente Falabella. Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Geotecnia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=8888@1>. Acesso em: 11 dez. 2021.

PACHECO, Pedro Gabino Mendoza. ANÁLISE NUMÉRICA DO FLUXO E DA ESTABILIDADE DE UMA PILHA DE LIXIVIAÇÃO DE MINÉRIO DE COBRE. 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ppg em Engenharia Civil, Puc-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=7749@1>. Acesso em: 11 dez. 2021.