

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Comportamento de Aterro Experimental Sobre Solo Mole Tratado com Colunas de Brita

Liliana Gonçalves Simões Pires

Engenheira Civil, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lilianagpires@gmail.com

Márcio de Souza Soares Almeida

Professor Titular, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, almeida@coc.ufrj.br

RESUMO: A execução de um aterro sobre colunas de brita em uma região de solos moles foi a alternativa escolhida para o tratamento do solo mole na região onde será construída a Estação de Tratamento de Esgoto (E.T.E.) Alcântara, em São Gonçalo – RJ. Na área de maior espessura de solo mole, denominada de Aterro Experimental, foram executadas 100 colunas de brita, através do método de vibro substituição, com diâmetro de 0,90 m, espaçamento entre eixos de 2,90 m e área de substituição de 7,5%. O aterro foi instrumentado com piezômetros, placas de recalque e indicador de nível d'água. Para avaliar os dados obtidos com a instrumentação foram utilizados métodos analíticos, numéricos e de previsão de recalques. O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de um aterro sobre colunas de brita em solos moles a partir da análise dos dados obtidos da instrumentação da área experimental. A utilização das colunas de brita para melhoramento do solo se mostrou adequada para a região, reduzindo o tempo para estabilização dos recalques. Os recalques totais calculados com a utilização dos métodos analíticos e numérico apresentaram boa concordância com as medidas de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Mole, Coluna de Brita, Instrumentação.

ABSTRACT: The execution of an embankment over stone columns in a region of soft soils was the chosen alternative for the treatment of soft soil in the region where the Alcântara sewage treatment plant will be built, in São Gonçalo - RJ. In the area of greater thickness of soft soil, denominated Experimental Embankment, 100 stone columns were executed, using the vibro replacement method, with a diameter of 0.90 m, a spacing between axes of 2.90 m and a replacement area of 7.5%. The embankment was instrumented with piezometers, settlement plates and water level indicator. Analytical, numerical and settlement prediction methods were used to evaluate the data obtained from instrumentation. The work aimed to evaluate the behavior of a soft soil embankment on stone columns compared with the analysis of data obtained from the experimental area instrumentation. The use of stone columns to improve the soil proved to be adequate for this region, as it reduced the consolidation time. The total settlements calculated with analytical and numerical methods showed good agreement with the field measurements.

KEYWORDS: Soft Soil, Stone Column, Instrumentation

1 Introdução

O caso de estudo deste trabalho é o aterro experimental da E.T.E. Alcântara, localizado na cidade de São Gonçalo – RJ, que é uma das diversas obras do programa de despoluição da Baía de Guanabara. Esta região se caracteriza por apresentar solo mole com baixa capacidade de suporte. Com o objetivo de avaliar previamente o comportamento do conjunto aterro-fundação, foi selecionada a região com maior espessura de solo mole, denominada de Aterro Experimental, onde foram executadas colunas de brita, com diâmetro de 0,90 m e espaçamento entre eixos de 2,90 m, como forma de melhoramento do solo.

Em geral as colunas possuem espaçamento variando entre 1,5 m a 3,0 m, diâmetros de 0,6 m a 1,0 m, resultando em uma área de substituição superior a 10% (Almeida *et al.*, 2014; Almeida e Marques, 2014). Poucos casos na literatura apresentam taxa de substituição inferior a 10%, como o caso apresentado neste trabalho de valor igual a 7,5%.

A execução de colunas de brita é um dos métodos mais utilizados para melhoramento de solos moles, pois além de promoverem a dissipação de poro pressões por drenagem radial, também aumentam a resistência do solo e aceleram os recalques (Almeida e Marques, 2014).

2 Aterro Experimental

A área do aterro experimental, localizado dentro da área tratada com colunas de brita de uma região maior, foi determinada por ser a região com maior espessura de solo mole, em torno de 10 m. Nesta região foram executadas 100 colunas de brita, em uma malha quadrada de 10 x 10 colunas, sendo 36 colunas delimitadas pela área abaixo da projeção do topo do aterro experimental e 64 colunas sob os taludes. As colunas têm diâmetro de 0,90 m e espaçamento entre eixos de 2,90 m. É importante salientar que o espaçamento utilizado de 2,90 m não é típico para colunas de brita, porém foi escolhido por razões econômicas. Na figura 1, a região assinalada pela cor laranja é o aterro experimental, a região identificada pela cor azul foi tratada com colunas de brita e a região identificada pela cor verde não teve tratamento.



Figura 1. Áreas com e sem tratamento de coluna de brita (adaptado de Google Earth, 2017) e aterro experimental finalizado.

A sequência construtiva do aterro experimental iniciou após a finalização das colunas de brita com a instalação de um geotêxtil não tecido e duas geogrelhas mono-axiais, dispostas perpendicularmente. Após esta etapa foi instalada a instrumentação e executada a camada drenante de 0,40 m de areia grossa. Por fim, foi feito o alteamento em camadas de 20 cm de aterro compactado, totalizando 5,35 m de altura.

O aterro foi instrumentado com seis placas de recalque, quatro piezômetros Casagrande, instalados na profundidade de 4,0 m abaixo do aterro de conquista e um indicador de nível d'água (I.N.A.). Com estes instrumentos foi possível analisar os dados obtidos em campo, avaliar a dissipação do excesso de poro pressão e o deslocamento vertical durante e após a construção do aterro.

A alternativa de instrumentação escolhida, mais simples e confiável, se deve ao prazo de entrega, à necessidade do aterro ficar pronto e operacional no início da obra e também da dificuldade de importação de equipamentos mais sofisticados.

3 Investigação Geotécnica

A investigação geotécnica realizada para a determinação dos parâmetros do solo compreendeu os ensaios apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de ensaios para a investigação geotécnica

	Piezocone	Palheta	Adensamento oedométrico	Caracterização	Sondagens a percussão
Ensaio	8	6	5	5	2

Os ensaios de adensamento foram realizados em cinco amostras em diferentes profundidades. Na tabela 2 estão apresentados as propriedades do solo mole, de acordo com os ensaios realizados, que serão utilizadas nas análises numéricas.

Tabela 2. Propriedades do solo mole de fundação.

Propriedades	Profundidade (m)				
	0,0 – 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 3,5	3,5 – 5,0	5,0 – 7,0
γ' (kN/m ³)	5,48	3,39	4,41	3,60	3,54
Cc [-]	0,32	1,36	0,86	1,69	1,65
Cs [-]	0,14	0,25	0,16	0,24	0,25
C α [-]	0,008	0,037	0,035	0,045	0,057
C α / Cc	0,025	0,027	0,041	0,027	0,035
e ₀ [-]	1,61	3,12	2,19	3,20	3,20
k _v (m/day)	7,6×10 ⁻⁵	2,2×10 ⁻⁵	8,8×10 ⁻⁶	5,9×10 ⁻⁵	2,2×10 ⁻⁵
k _h (m/day)	1,1×10 ⁻⁴	3,3×10 ⁻⁵	1,3×10 ⁻⁵	8,8×10 ⁻⁵	3,4×10 ⁻⁵
OCR [-]	6,39	1,61	1,23	1,18	1,44
K _o [-]	1,27	0,66	0,58	0,57	0,63

4 Resultados da Instrumentação

A instrumentação está localizada na região central do aterro, sendo que os quatro piezômetros Casagrande foram instalados no centro geométrico entre quatro colunas de brita (PZ1A, PZ2A, PZ3A e PZ4A). Das seis placas de recalque instaladas, três foram instaladas no topo das colunas de brita (PR1, PR5 e PR6), duas foram instaladas junto aos piezômetros (PR3 e PR4) e a última entre duas colunas de brita (PR2), conforme ilustrado na figura 2.

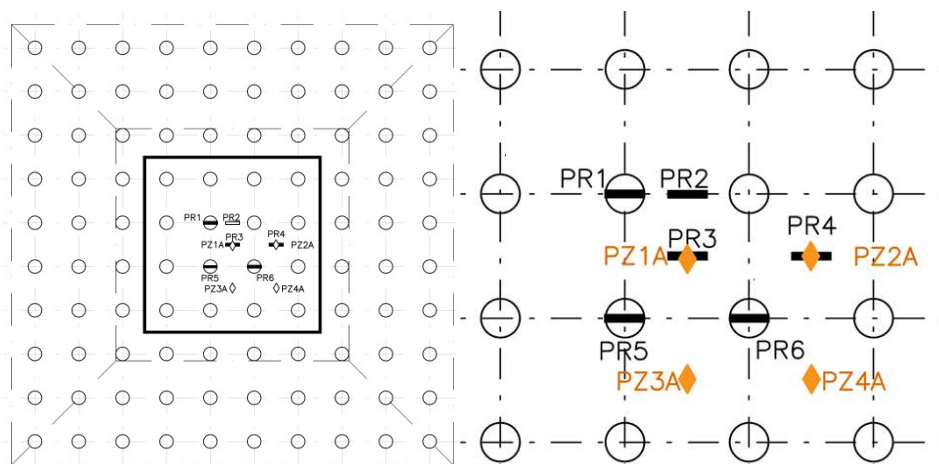


Figura 2. Localização da instrumentação.

As leituras das placas de recalque foram realizadas por nivelamento topográfico, com base em um ponto de referência fixo próximo ao aterro. As placas de recalque, escolhidas por possuírem resposta imediata, de boa precisão e medição mecânica, apresentaram recalques com média de 1,38 m para o período de acompanhamento do monitoramento de 719 dias (1,97 anos). As placas localizadas no topo das colunas de brita apresentaram recalques ligeiramente inferiores, cerca de 4 cm, aos daquelas localizadas entre colunas de brita.



No início da execução do aterro verificou-se que as leituras dos piezômetros, a partir das primeiras camadas até a cota de 4,0 m, apresentaram resultados coerentes com a execução do aterro. Durante a execução das camadas o excesso de poro pressão aumentou e nos períodos de adensamento o excesso de poro pressão diminuiu. Após o término do aterro, em função de problemas na instrumentação, não foi possível determinar o tempo necessário para a dissipação do excesso de poro pressão. Os resultados de recalque e dissipação de poro pressão estão apresentados mais detalhadamente em Pires (2017).

5 Análise dos Resultados

Com base nos resultados obtidos em campo, foram realizadas análises com métodos analíticos, numéricos e de previsão de desempenho. A seguir são apresentados os resultados obtidos com o método de Priebe (1995), de Asaoka (1978), de Han e Ye (2002) e através de análises numéricas realizadas com auxílio do *software Plaxis*. Em todas as análises aqui realizadas se admitiu a hipótese de que a parte central do aterro configura uma condição possível de ser analisada por uma condição de aterro infinito lateralmente nas duas direções, ou seja, uma condição de deformações unidimensionais.

5.1 Método de Priebe

O valor do recalque do solo mole sem colunas (Δh), utilizando os parâmetros apresentados na tabela 2 para as amostras e considerando a equação clássica de adensamento (Terzaghi, 1943), resultou no recalque (Δh) de 2,21 m considerando os efeitos da submersão.

Com a utilização do método simplificado de Priebe, que considera apenas a razão de A/A_c e o ângulo de atrito do material granular, determinou-se os fatores de melhoria n_0 , n_1 e n_2 . A obtenção dos valores dos fatores de melhoria foi realizada por meio das equações de Priebe, devido a relação de A/A_c (A : área de influência da coluna e A_c : área da coluna) ser igual a 13,26 (razão de substituição de áreas igual a 7,5%). Os valores obtidos para n_0 , n_1 e n_2 foram 1,39, 1,38 e 1,65 respectivamente. Verifica-se que os valores de n_0 e n_1 são praticamente iguais, evidenciando que a consideração da compressibilidade do material não altera o valor do coeficiente de melhoramento do solo. Para o aterro experimental, n_2 foi o que apresentou melhor concordância com os resultados obtidos pela instrumentação.

5.2 Análises Numéricas

As análises numéricas foram realizadas utilizando o *software Plaxis* (Brinkgreve e Vermeer, 2002), considerando o modelo axi-simétrico, onde é analisado uma coluna de brita e sua área de influência. Foram adotados os modelos constitutivos (não drenados) de *Soft Soil Creep* para o solo mole e Mohr-Coulomb (drenado) para as colunas granulares, material de aterro, plataforma de trabalho e areia compacta. Na figura 3 está ilustrada a geometria da seção do aterro e das colunas de brita no centro da área experimental considerada para a análise. O diâmetro equivalente da coluna de brita, para malha quadrada, resultou em 3,28 m. Estão também apresentados na figura 3 os valores de SPT das duas sondagem à percussão realizadas.

O modelo consiste em seis camadas de solo mole, totalizando uma espessura de 10 m e abaixo do solo mole, uma camada de 5,15 m de areia compacta. A sexta camada de solo mole foi considerada, por simplificação, igual a quinta camada (mesmos parâmetros), com a diferença de considerar valor de OCR igual a 1,0.

Na tabela 2 foram apresentados os parâmetros utilizados para a realização das análises numéricas no modelo *Soft Soil Creep*, para cada amostra, representando as diferentes profundidades. Os valores de coesão e ângulo de atrito foram considerados iguais a 3,0 kPa e 28°, respectivamente. Os parâmetros adotados para o aterro, aterro de conquista, areia compacta e para a coluna de brita, estão apresentados na tabela 3 (Lima *et al.*, 2019).

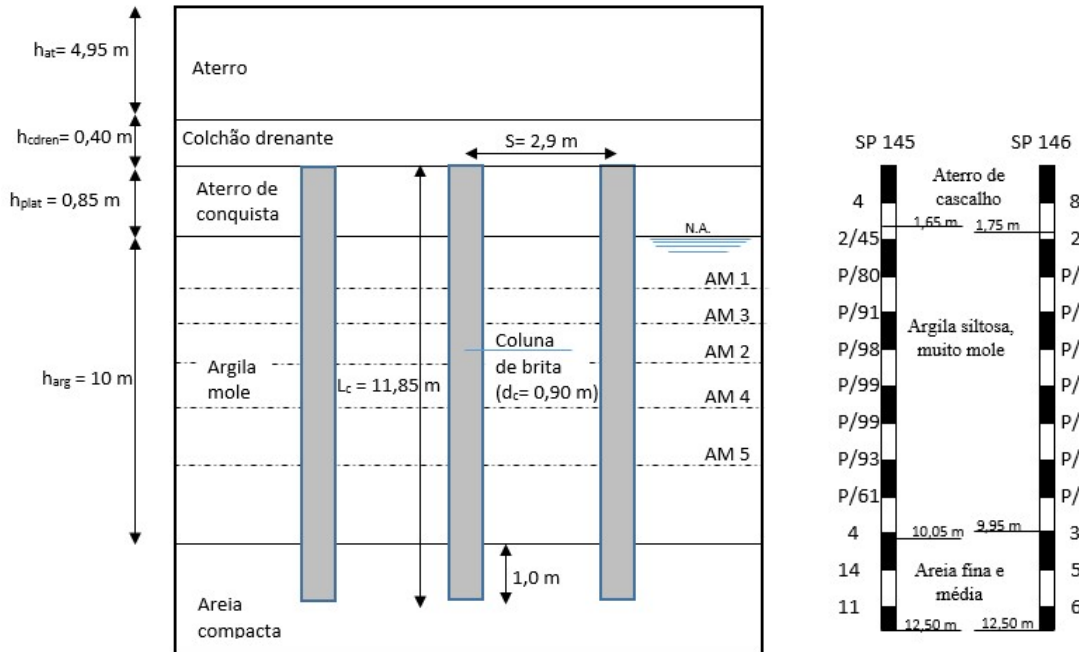


Figura 3. Seção do aterro e das colunas de brita no centro da área experimental; valores de SPT das sondagens.

Tabela 3. Propriedades dos materiais utilizados na análise numérica.

Propriedades	Aterro	Aterro de conquista	Areia compacta	Coluna de brita	Camada drenante
Peso específico γ (kN/m ³)	21,1	20,0	20,0	20,0	17,1
Ângulo de atrito efetivo ϕ' (°)	30,0	30,0	35,0	40,0	35,0
Coesão efetiva c' (kPa)	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Módulo de Elasticidade E (MPa)	25,0	30,0	45,0	80,0	45,0
Coefficiente de Poisson ν [-]	0,33	0,30	0,25	0,30	0,28
Coefficiente de permeabilidade $k_h = k_v$ (m/dia)	1,0	0,86	1,73	86,4	32,4

Para verificar o efeito da instalação das colunas de brita foram realizadas análises numéricas variando o parâmetro K^* (coeficiente de empuxo do solo) para os valores de K_0 , 1 (critério do Método de Priebe), 1,2 e 1,5. Para as análises de recalque variando com o tempo, o valor de K^* que melhor caracteriza os resultados de campo foi K^* igual a K_0 (coeficiente de empuxo do solo no repouso). Esta verificação está de acordo com o demonstrado por Elshalzy *et al.* (2008), que apresentam valores de K^* variando com o espaçamento das colunas de brita, onde menores valores de K^* são mais adequados para maiores espaçamentos entre colunas. Foram realizadas análises também para verificar a influência do refinamento da malha, variando entre média, fina e muito fina. Utilizando os mesmos parâmetros anteriormente descritos verificou-se uma diferença de 0,62% no valor do recalque final, ou seja, pouca influência do refinamento de malha para o resultado de recalque.

5.3 Método de Asaoka

O método de Asaoka (1978), modificado por Magnan e Deroy (1980), é um dos métodos de análise de desempenho que, a partir dos dados de evolução de recalque com o tempo obtidos em campo, permite determinar a previsão de recalque final e o coeficiente de adensamento. Este método é aplicado para situações

com e sem drenos, considerando drenagem radial, vertical ou combinada (Almeida e Marques, 2014) e só deve ser aplicado após transcorridos, no mínimo, 60% de adensamento (Asaoka, 1978).

Com os dados de campo do aterro experimental foram avaliados os intervalos de tempo (Δt) de 60 e 30 dias. Os resultados obtidos para previsão de recalques, tempo de estabilização de 95% dos recalques e coeficiente de adensamento horizontal (c_h) estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Resultados pelo Método de Asaoka.

	Recalque (cm)	$t_{95\%}$ (anos)	c_h (m ² /s)
$\Delta t = 30$ dias	147,2	0,81	$1,27 \times 10^{-7}$
$\Delta t = 60$ dias	143,2	1,29	$7,94 \times 10^{-8}$

De acordo com os dados obtidos nos ensaios de piezocone, para as profundidade de 4,0 a 7,0 m, os valores de c_h variaram entre $1,0 \times 10^{-8}$ m²/s e $4,6 \times 10^{-8}$ m²/s. Verifica-se que os resultados obtidos pelo Método de Asaoka são maiores aos verificados nos ensaios in situ.

Na figura 4 está ilustrado um comparativo das curvas de recalque com o tempo, obtidas a partir da análise numérica, dos resultados de campo e com a previsão de Asaoka. Para a determinação da curva recalque versus tempo foram utilizadas as equações desenvolvidas por Barron (1948) para drenos e foi utilizada a correção gráfica proposta por Gilboy (1936, apud Caputo, 1988).

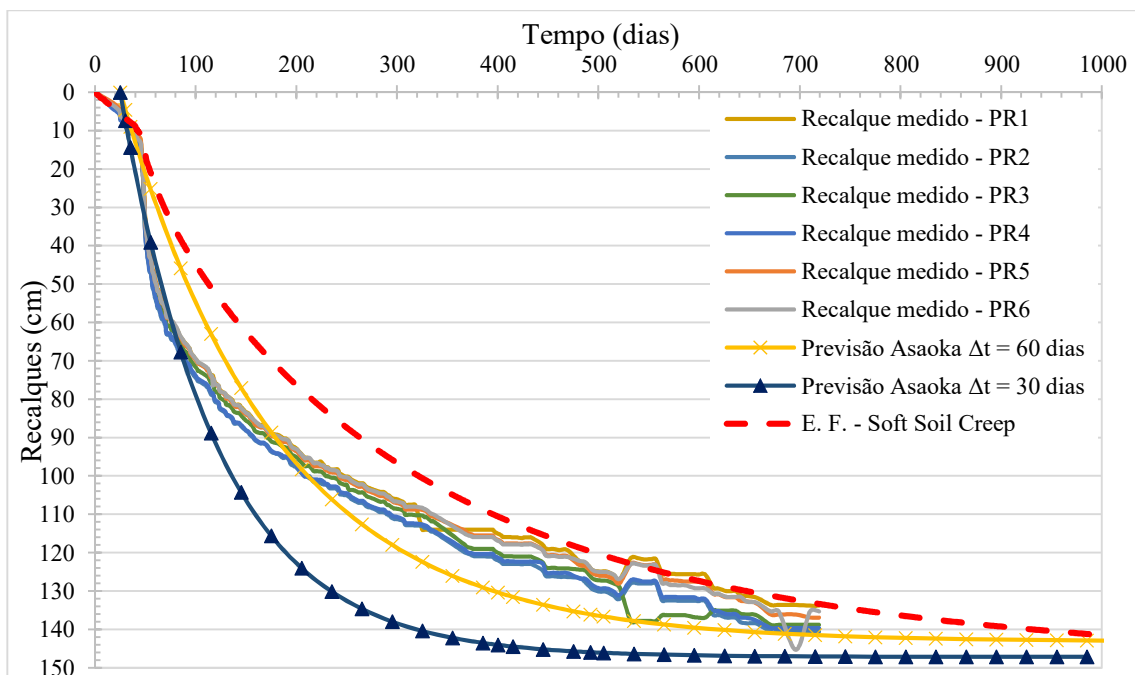


Figura 4. Seção do aterro e das colunas de brita no centro da área experimental.

5.4 Tempo de Estabilização

Para o cálculo do tempo de estabilização dos recalques, considerando apenas a drenagem vertical (unidimensional), foram utilizadas as expressões simplificadas apresentadas por Terzaghi (1943) para determinar a porcentagem de adensamento variando com o tempo. Admitindo c_v igual a c_h calculado pelo método de Asaoka para drenagem radial pura (c_h igual a $7,94 \times 10^{-8}$ m²/s) e considerando a distância de drenagem igual a metade da espessura de solo mole (H_d igual a 5 m), determinou-se o tempo necessário para estabilização de 95% dos recalques, que resultou igual a 11,3 anos.

Em 2002, Han e Ye desenvolveram uma solução simplificada para determinar o tempo necessário para a estabilização de 95% dos recalques. Lima (2012) apresentou um amplo estudo sobre o fator de concentração de tensões (n_s), dados de diversos autores, que em sua grande maioria recomendam valores de n_s entre 2 e 5



para a situação final do adensamento. Almeida *et al.* (2020) verificaram que o valor do fator de concentração de tensões (n_s) se mantém igual a 4 independente da espessura de solo mole, de acordo com as análises realizadas para solos moles variando de 5 a 20 m de profundidade.

Para a análise do aterro experimental foram considerados valores de n_s iguais a 3 e 5 e os resultados foram de 477 dias (1,31 anos) e 420 dias (1,15 anos), respectivamente, considerando o c_h determinado pelo método de Asaoka para 60 dias. Verificou-se que os valores para o tempo de estabilização sofrem pequena variação em relação ao fator de concentrações de tensões.

O resultado para o tempo de estabilização calculado pelo método de Han e Ye foi inferior ao verificado em campo, de 1,97 anos. Desta forma, seria mais adequada a utilização de um valor de n_s inferior a 3 no método de Han e Ye, como indicam Almeida *et al.*, (2014) e Hosseinpour *et al.*, (2015).

6 Conclusões

Com o objetivo de avaliar o comportamento de um aterro sobre colunas de brita em solos moles, foram realizadas análises dos dados obtidos na instrumentação de uma área experimental onde foram executadas 100 colunas de brita com diâmetro de 0,90 m e espaçamento entre eixos de 2,90 m. Apesar da utilização de uma instrumentação simples, os dados provêm de uma obra real, em verdadeira grandeza, em que a execução do experimento foi necessária para o entendimento do comportamento do solo. Os resultados obtidos para recalque do solo com e sem colunas e o fator de melhoramento do solo estão apresentados na tabela 5, enquanto que na tabela 6 estão apresentados os valores de tempo necessário para estabilização de 95% dos recalques.

A análise numérica realizada para obtenção da curva de recalque versus tempo apresentou comportamento semelhante ao verificado em campo, porém com maior tempo para atingir o recalque final. Para a geometria do aterro experimental, com espaçamento fora do padrão, foi considerado o valor de K^* igual a K_0 nas análises numéricas, pois foi o valor que melhor caracterizou os resultados de campo.

Tabela 5. Valores de recalque e fator de melhoramento do solo – aterro experimental.

Método	Recalque com colunas (m)	Recalque sem colunas (m)	Fator de melhoramento
Priebe	1,59 (n_0) 1,34 (n_2)		$n_0 = 1,39$ $n_2 = 1,65$
Análise numérica	1,53	1,71	1,12
Previsão de Asaoka	1,43		
Leitura das placas de recalque em nov/2017 (média)	1,38		
Cálculo clássico		2,21	

Tabela 6. Valores de tempo de estabilização – aterro experimental.

Método	t_{95} radial (ano)	t_{95} 1D (ano)
Han e Ye	1,31	-
Análise numérica	3,42	46,9
Previsão de Asaoka	1,29	-
Terzaghi	-	11,3

O fator de melhoramento n_2 obtido pelo método de Priebe foi o que apresentou melhor concordância com os resultados obtidos pela instrumentação. Já o valor obtido pela análise numérica foi mais conservador, indicando que a utilização das colunas não reduziria o valor dos recalques.

A partir dos dados de recalque e tempo de estabilização, verifica-se que a coluna de brita teve, neste caso, mais vantagem em diminuir o tempo de estabilização de recalques do que em diminuir a magnitude de recalques. O tempo de monitoramento até o final desta pesquisa foi de 719 dias (1,97 anos) e o aterro não havia atingido a estabilidade. A análise numérica foi a que apresentou maior tempo para estabilização dos recalques e o método de Han e Ye resultou em um tempo inferior ao verificado em campo.



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Saneamento Ambiental dos Municípios do Entorno da Baía de Guanabara (PSAM) do Governo do Estado do Rio de Janeiro por seu importante apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. S. S.; Hosseinpour, I.; Riccio, M. Alexiew, D. (2014) Behavior of geotextile-encased granular columns supporting test embankment on soft deposit, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Almeida, M. S. S.; Hosseinpour, I.; Riccio, M. (2020) Embankment on encased granular columns treated soft soil: field and numerical studies, *4th Panamerican Conference on Geosynthetics (GeoAmericas)*, Brasil.
- Almeida, M. S. S.; Lima, B. T.; Riccio, M.; Jud, H.; Almeida, M. C. F.; Roza, F. (2014), Stone columns field test: monitoring data and numerical analyses, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 45, No. 1, pp. 103–112.
- Almeida, M. S. S.; Marques, M. E. S. (2014) *Aterros sobre solos moles*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Asaoka, A. (1978) Observation procedure of settlement prediction, *Soil and Foundation*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 18, n° 4, December, pp. 87-101.
- Barron, R. A. (1948) Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Transactions, paper 2346, vol. 113, pp. 718-754.
- Brinkgreve, R. B. J.; Vermeer, P. A. (2002) *PLAXIS: Finite element code for soil and rock analysis*, Version 8. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Caputo, H. P. (1988) *Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos*. Vol. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Elshazly, H. A.; Elkasabgy, M.; Elleboudy, A. (2008) Effect of inter-column spacing on soil stresses due to vibro-installed stone columns: interesting findings. *Geotech Geol Eng* 26, pp. 225–236.
- Han, J.; Ye, S. L. (2002) A theoretical solution for consolidation rates of stone column-reinforced foundations accounting for smear and well resistance effects. *The International Journal of Geomechanics*. 2(2), pp. 135–151.
- Hosseinpour, I.; Almeida, M. S. S.; Riccio, M. (2015) Full-scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns. *Geosynthetics International*, vol. 08, pp. 428-438.
- Lima, B. T. (2012). *Estudo do uso de colunas de brita em solos argilosos muito moles*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 321 p.
- Lima, B. T.; Almeida, M. S. S.; Hosseinpour, I. (2019) Field measured and simulated performance of a stone columns-strengthened soft clay deposit, *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Magnan, J. P.; Deroy, J. M. (1980) Analyse graphique des tassement observes sons ler ouvrage, *Bull-Liaison Laboratoire des Ponts e Chaussés*, Paris, 109, September-October, pp. 9- 21.
- Pires, L. G. S. (2017) Comportamento de aterro experimental sobre solo mole tratado com colunas de brita, *Dissertação de Mestrado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 162 p.
- Priebe, H. J. (1995) The design of vibro replacement. *Ground Engineering*. Vol. 28, n° 10.
- Terzaghi, K. (1943) *Theoretical soil mechanics*, New York: John Wiley & Sons.