

Dimensionamento de Colunas de Brita Como Solução Para Aterros Sobre Solos Moles: Uma Aplicação do Método de Priebe

Kamily Bernardo Demétrio

Graduanda em Engenharia Civil, Nova Engevix Engenharia, São José, Brasil,
kamily.demetrio@novaengevix.com.br

Lucas Rodrigues Heckrath

Engenheiro Civil, Nova Engevix Engenharia, Florianópolis, Brasil, lucas.heckrath@novaengevix.com.br

Gisele Marilha Pereira Reginatto

Engenheira Civil, Nova Engevix Engenharia, Florianópolis, Brasil, gisele.reginatto@novaengevix.com.br

Darlan Tomazini

Engenheiro Civil, Nova Engevix Engenharia, Florianópolis, Brasil, eng.darlan@gmail.com

Heitor Venâncio Conceição de Lima Batista

Engenheiro Civil, Nova Engevix Engenharia, Florianópolis, Brasil, heitor.lima@novaengevix.com.br

RESUMO: Os solos moles, frequentemente encontrados na região litorânea brasileira, são caracterizados por sua baixa resistência e alta compressibilidade. Quando submetidos a sobrecargas, tornam-se suscetíveis a recalques elevados ou até rupturas, comprometendo a estabilidade das estruturas projetadas sobre eles. Para evitar esses efeitos, empregam-se técnicas como execução de aterros em etapas, bermas de equilíbrio, geodrenos e geogrelhas. No entanto, quando essas soluções não são as mais adequadas devido à restrições de prazo ou interferências na área de execução, outras alternativas podem ser avaliadas. Nesse contexto, destaca-se a execução de colunas de brita como uma solução eficiente para a melhoria das propriedades geotécnicas do solo, promovendo o aumento da resistência, a redução dos recalques e a diminuição do tempo necessário para sua ocorrência. Este estudo tem como objetivo apresentar o dimensionamento de colunas de brita para a melhoria do solo de fundação de um aterro hipotético projetado sobre solos moles na cidade de Paulo Lopes (SC). A metodologia adotada seguiu o método de Priebe, considerando parâmetros como o coeficiente de eficácia de drenagem, fator de redução da tensão horizontal e proporção da área substituída. Foram realizados ensaios de campo, palheta (*Vane Test*) e piezocone (CPTu) para a caracterização geológico-geotécnica do solo e calibração dos parâmetros empregados no dimensionamento. Os resultados indicaram que o efeito da vibrosubstituição proporcionou uma melhoria significativa na capacidade de suporte do solo, além de reduzir os recalques e o tempo para sua ocorrência, apresentando-se como uma solução eficaz para garantir a estabilidade do aterro.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Moles, Dimensionamento, Colunas de Brita, Método de Priebe.

ABSTRACT: Soft soils, frequently found in Brazil's coastal regions, are characterized by low strength and high compressibility. When subjected to overloads, they become susceptible to significant settlements or even ruptures, compromising the stability of structures built upon them. To prevent these effects, techniques such as staged construction, stability berms, geodrain, and geogrids are employed. However, when these solutions are not the most suitable due to time constraints or interferences in the execution area, other alternatives may be evaluated. In this context, the execution of stone columns stands out as an efficient solution for improving the geotechnical properties of the soil, promoting increased strength, reduced settlements, and a decrease in the time required for their occurrence. This study aims to present the design of stone columns for the improvement of the foundation soil of a hypothetical embankment projected on soft soils in the city of Paulo Lopes, Santa Catarina. The methodology adopted followed Priebe's method, considering parameters such as the drainage efficiency coefficient, horizontal stress reduction factor, and area replacement ratio. Field tests, including *Vane Test* and Piezocone (CPTu), were conducted for the geological-geotechnical characterization of the soil and calibration of the parameters used in the design. The results indicated that the vibro-replacement



effect provided a significant improvement in the soil's bearing capacity, in addition to reducing settlements and the time for their occurrence, proving to be an effective solution to ensure the stability of the embankment.

KEYWORDS: Soft Soils, Design, Stone Columns, Priebe's Method.

1 INTRODUÇÃO

A expansão urbana e a implantação de infraestruturas em regiões litorâneas brasileiras demandam soluções para a construção sobre solos moles. Esses solos, predominantemente compostos por argilas de alta plasticidade e baixa resistência, apresentam comportamento compressível e deformável sob carregamentos, comprometendo a estabilidade e a durabilidade de aterros e outras estruturas.

Diversas soluções têm sido desenvolvidas e empregadas para lidar com essa problemática, dentre as quais citam-se: sobrecargas, geodrenos verticais, execução de aterros em etapas e reforços com geossintéticos. No entanto, em contextos onde essas soluções não são viáveis, seja por restrições de tempo, espaço ou interferência com outras estruturas, outras alternativas tornam-se necessárias. Uma solução promissora nesse cenário é a utilização de colunas de brita instaladas por meio do processo de vibrosubstituição (*vibro replacement*).

Priebe *et al* (1995) desenvolveram um método (o método de Priebe), que permite quantificar o efeito da inclusão das colunas por vibrosubstituição no comportamento do solo, por meio da definição de fatores de melhoria. Esses fatores, dentre outros, levam em consideração parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo mole e do material de preenchimento da coluna e a razão de área substituída. Esse método fornece uma abordagem teórica estruturada, baseada em modelos mecânicos e geométricos.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o dimensionamento de colunas de brita pelo método de Priebe, aplicado em um aterro hipotético assente sobre os solos moles presentes no município de Paulo Lopes (SC). A definição do perfil estratigráfico e dos parâmetros do solo de fundação foi baseada em ensaios de CPTu e *Vane Test*. Com isso, busca-se apresentar o potencial dessa técnica na melhoria da capacidade de suporte do solo, bem como na redução dos recalques e do tempo necessário para a sua ocorrência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Conceito da Vibrosubstituição

Segundo Priebe *et al* (1995), a vibrosubstituição é uma técnica de melhoramento utilizada para solos em que a vibrocompactação é inviável. Consiste na instalação de colunas verticais de material granular compactado por meio da vibração, promovendo o deslocamento lateral do solo até a profundidade especificada. Essa técnica resulta na melhoria das propriedades mecânicas do solo, acelera o processo de adensamento e minimiza os recalques, em função da rigidez e permeabilidade das colunas.

2.2 O Método de Priebe

Embora ainda não existam normas brasileiras específicas para o dimensionamento de colunas de brita, a prática geotécnica recorre a métodos consolidados internacionalmente. Dentre esses, o modelo proposto por Priebe *et al* (1995) destaca-se por sua ampla aplicação e fundamentação teórica consistente. O método utiliza o conceito de célula unitária, que representa uma única coluna de brita associada ao volume de solo adjacente, permitindo uma análise simplificada do comportamento do sistema (solo-coluna). Com base na metodologia, o ganho de desempenho relacionado à resistência e compressibilidade do solo tratado é estimado por meio de fatores de melhoria, os quais dependem de parâmetros geométricos e de resistência do conjunto (solo-coluna).

3 METODOLOGIA

3.1 Localização da Área de Estudos

Para compor o solo de fundação do aterro hipotético proposto neste estudo, foi selecionada a área indicada na Figura 1, situada às margens da rodovia BR-101, no município de Paulo Lopes, Santa Catarina,

devido à presença de depósitos de solos moles. Trata-se de uma região de depósitos de planície lagunar associada à barreira III, segundo o mapa na escala 1:500.000 do CPRM (2014).



Figura 1. Localização da área de estudo em Paulo Lopes (SC)

3.2 Definição dos Parâmetros Geológicos – Geotécnicos

A espessura da camada de solo mole foi definida com base nos resultados do ensaio CPTu, a partir do qual também foram estimados o peso específico (γ) e módulo de elasticidade (E_s) desse solo, empregando, respectivamente, as Equações (1) e (2). Essas equações consideram o fator de atrito do cone (R_f), a resistência de ponta corrigida (q_t) a pressão atmosférica (P_a) e o índice de rigidez do solo (I_r). O valor de resistência não drenada (S_u) foi definido a partir do ensaio de palheta (*Vane Test*).

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0,27 * (\log R_f) + 0,36 * \left[\log \left(\frac{q_t}{P_a} \right) \right] + 1,236 \quad (1)$$

$$E_s = I_r * S_u \quad (2)$$

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do aterro, como a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ), bem como o peso específico (γ), foram adotados com base em valores típicos obtidos em projetos similares.

3.3 Etapas do Dimensionamento

3.3.1 Definição da Célula Unitária e Razão de Área

A aplicação prática do conceito de célula unitária no método de Priebe *et al* (1995) inicia com a definição do diâmetro da coluna de brita (d_c) e do espaçamento entre elas (S), parâmetros que dependem da natureza do solo a ser melhorado e da disponibilidade de material granular para o preenchimento da coluna. Após a definição dessas variáveis, calcula-se o diâmetro equivalente da célula unitária (D_e), com base na geometria da malha de colunas adotada. Para uma malha quadrada $D_e = 1,20 * S$ e para uma malha triangular $D_e = 1,05 * S$.

3.3.2 Fator de Melhoria Básico (n_0)



2 0 2 5

O fator de melhoria básico (n_0), representa o incremento inicial da rigidez do solo decorrente da inclusão de uma célula unitária, submetida a um carregamento vertical, sob um conjunto de hipóteses simplificadoras: a coluna granular é incompressível, encontra-se apoiada sobre uma camada rígida e os pesos específicos do solo e do material da coluna são desprezados. Nessas condições, assume-se que a deformação ocorre exclusivamente por abaulamento lateral da coluna, enquanto o solo no entorno responde elasticamente. Com base nessas premissas, n_0 é obtido pela Equação (3), que considera a área da coluna granular (A_c) a área da célula unitária (A), o coeficiente de Poisson do solo (μ_s) e o coeficiente de empuxo ativo da coluna (K_{ac}).

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} * \left[\frac{\frac{1}{2} + f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right)}{K_{ac} * f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (3)$$

Onde a função $f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right)$ é dada pela Equação (4).

$$f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right) = \frac{(1 - \mu_s) * \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)}{1 - 2\mu_s + \frac{A_c}{A}} \quad (4)$$

3.3.3 Correção por Compressibilidade da Coluna (n_1)

A estimativa inicial do fator de melhoria (n_0), pressupõe que a coluna granular seja perfeitamente rígida. No entanto, na prática, esse material também apresenta certa compressibilidade. Isso ocorre porque o próprio material granular também sofre deformações sob carregamento. Para considerar esse efeito, o fator n_1 é calculado com base em uma razão de área corrigida da seção da coluna (\bar{A}_c/A), que representa uma área equivalente que compensaria a perda de eficiência da coluna quando submetida a compressão, conforme apresentado na Equação (5).

$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} * \left[\frac{\frac{1}{2} + f\left(\mu_s, \frac{\bar{A}_c}{A}\right)}{K_{ac} * f\left(\mu_s, \frac{\bar{A}_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (5)$$

Onde a razão de área corrigida $\frac{\bar{A}_c}{A}$ é determinada pela Equação (6).

$$\frac{\bar{A}_c}{A} = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)} \quad (6)$$

A razão de área associada $\left(\frac{A_c}{A}\right)_1$ é determinada pela Equação (7).

$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = -\frac{4 * K_{ac} * (n_0 - 2) + 5}{2 * (4 * K_{ac} - 1)} \pm \frac{1}{2} * \sqrt{\left[\frac{4 * K_{ac} * (n_0 - 2) + 5}{4 * K_{ac} - 1}\right]^2 + \frac{16 * K_{ac} * (n_0 - 1)}{4 * K_{ac} - 1}} \quad (7)$$

E o fator de redução de eficiência $\Delta\left(\frac{A_c}{A}\right)$ é determinado pela Equação (8).

$$\Delta\left(\frac{A_c}{A}\right) = \frac{1}{\left(\frac{A_c}{A}\right)_1} - 1 \quad (8)$$

3.3.4 Fator de Melhoria Final (n_2)



Desconsiderar o peso próprio do solo e da coluna granular significa ignorar a pressão de confinamento natural exercida por esses materiais, a qual tem um papel relevante na estabilização das colunas. Essa pressão lateral, atua restringindo o abaulamento da coluna quando submetida a carregamento vertical, o que contribui para o aumento da sua capacidade de carga e da eficácia do reforço. Desta forma, aplica-se um fator de profundidade (f_d), que corrige o fator de melhoria (n_1), resultando no fator de melhoria final (n_2), calculado pela Equação (9). O fator de profundidade (f_d) é obtido pela Equação (10), que considera o coeficiente de empuxo em repouso (K_{0c}), as tensões verticais totais (σ_v) e as parcelas de carga do solo (P_s) e da coluna (P_c).

$$n_2 = n_1 * f_d \quad (9)$$

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c} - \frac{\sigma_{vs}}{\sigma_{vc}} * \frac{\sigma_{vc}}{P_c}}{K_{0c}}} \quad (10)$$

Onde as parcelas de carga são definidas a partir das Equações (11) e (12).

$$P_c = \frac{p}{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - \frac{A_c}{A}}{\frac{P_c}{P_s}}} \quad (11)$$

$$\frac{P_c}{P_s} = \frac{\frac{1}{2} + f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right)}{K_{ac} * f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right)} \quad (12)$$

3.3.5 Redistribuição de Carga (m')

Após a execução das colunas granulares, o solo passa a apresentar um comportamento significativamente mais eficiente em termos de suporte de carga. Isso ocorre porque, com a presença das colunas, uma ruptura só se desenvolve caso ocorra cisalhamento nas próprias colunas, o que confere maior rigidez ao sistema composto.

Devido à diferença de rigidez entre os materiais, as colunas recebem uma parcela maior da carga total aplicada. Essa distribuição desigual de esforços entre coluna e solo é determinada pelo fator de redistribuição de carga (m') dado pela Equação (13).

$$m' = \frac{(n_1 - 1)}{n_1} \quad (13)$$

3.3.6 Parâmetros do Solo Reforçado

Com a proporção de carga redistribuída (m') determinada, é possível calcular os parâmetros de resistência equivalentes do maciço solo-coluna, o que permite representar o sistema reforçado como um material homogêneo, cujos parâmetros de coesão (c'), ângulo de atrito ($\bar{\varphi}$) e peso específico (γ') são obtidos, respectivamente, pelas Equações (14), (15) e (16). A partir desses dados, foi possível realizar a análise de estabilidade do aterro hipotético e verificar se o fator de segurança (FS) obtido atende aos critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 11682 (2009). A análise de estabilidade foi realizada com o auxílio do *software* GeoSlope.

$$\tan \bar{\varphi} = m' * \tan \varphi_c + (1 - m') * \tan \varphi_s \quad (14)$$

$$c' = (1 - m') * c_s \quad (15)$$

$$\gamma' = \left(\gamma_c * \frac{A_c}{A}\right) + \gamma_s * \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) \quad (16)$$

3.3.7 Determinação do Recalque Total

Para estimar o recalque total do solo reforçado (S), foi utilizada a Equação (17), que considera a tensão vertical aplicada na superfície (p), a profundidade da coluna (z), o módulo de deformabilidade do solo (Ds) e o fator de melhoria final (n_2).

$$s = p * \frac{z}{D_S * n_2} \quad (17)$$

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização Geológica – Geotécnica do solo de fundação

De acordo com o perfil obtido no ensaio de piezocone (CPTu), realizado na área de estudos e apresentado na Figura 2, foi identificada uma camada de solo mole com 4,5 m de espessura a partir da superfície do terreno natural.

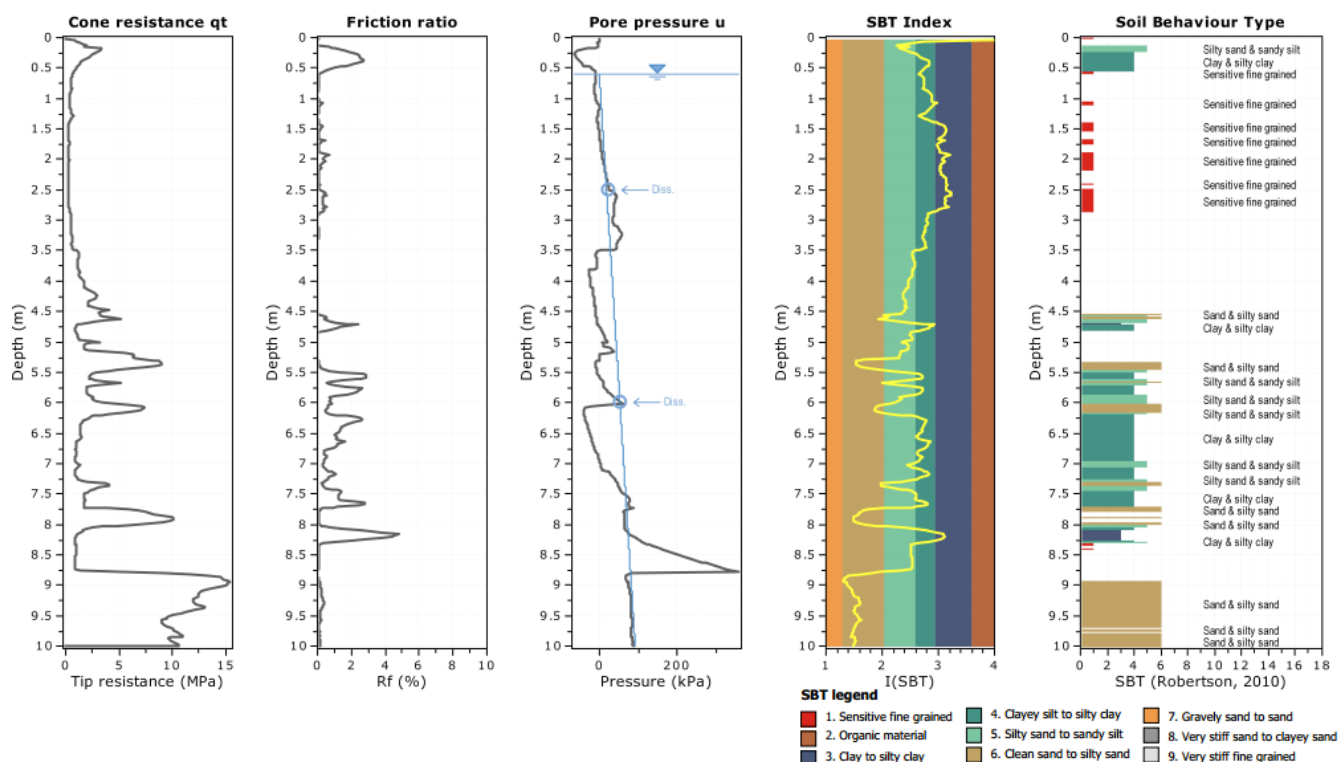


Figura 2. Perfil de resistência de ponta, poro-pressão e granulometria obtidos no ensaio CPTu

Os parâmetros geotécnicos do solo mole, empregados no dimensionamento das colunas de brita, estimados com base nos dados do piezocone e *Vane Test*, estão apresentados na Tabela 1. Nessa tabela também estão apresentados os parâmetros do aterro hipotético.

Tabela 1. Parâmetros Geotécnicos do Solo Mole e do Aterro.

Material	Espessura/Altura (m)	Su / c (kPa)	γ_s (kN/m ³)	Es (MPa)	ϕ_s (°)	η
Solo Mole	4,50	23,00	14,60	2,97	0	0,33
Aterro	5,00	5,00	18,00	-	30	-

4.2 Dimensionamento da Coluna de Brita



Com base na metodologia de Priebe *et al* (1995), foi dimensionada a coluna de brita para o caso em estudo, considerando malha quadrada. As características geométricas e de resistência da coluna estão apresentadas na Tabela 2, as quais foram definidas com base em padrões usualmente adotados no mercado e em valores de projetos similares. A partir desses dados, foi possível determinar os parâmetros do solo melhorado, os quais estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Parâmetros de Dimensionamento da Coluna de Brita

Diâmetro (m)	Espaçamento (m)	Profundidade (m)	ϕ_c (°)	γ_c (kN/m ³)	Es (MPa)
0,80	1,50	5,00	40	20,00	80,00

Tabela 3. Parâmetros de Estabilidade do Solo Melhorado

n ₁	m'	γ' (kN/m ³)	c' (kPa)	$\bar{\phi}$ (°)
1,68	0,40	15,80	13,71	19

4.3 Análise de Estabilidade

Com os parâmetros de estabilidade do solo melhorados, foi realizada a análise de estabilidade global do aterro, para obtenção do FS, o qual foi comparado com o FS para o cenário sem o tratamento do solo, conforme a norma ABNT NBR 11682 (2009). As análises de estabilidade estão apresentadas na Figura 3.

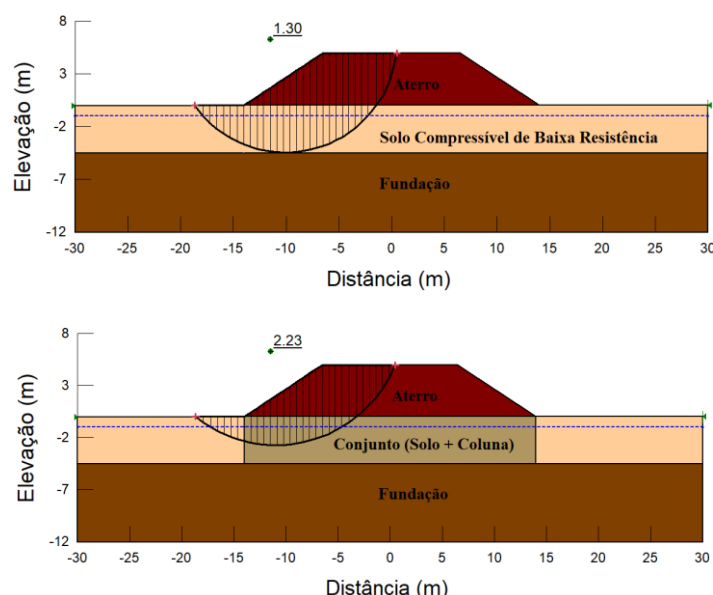


Figura 3. Análise de Estabilidade

Observa-se que, com o tratamento do solo, FS aumentou de 1,30 para 2,23 (acréscimo de 71,5%). Com isso, o FS passou a atender os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 11682 (2009), que para o caso em estudo exige um FS mínimo de 1,5, tendo em vista que o dano potencial é classificado como médio para vidas humanas e alto para danos materiais e ambientais.

4.4 Análise do Recalque

O recalque total calculado para o caso em estudo, está apresentado na Tabela 4, juntamente com o fator de melhoria final (n_2) e o fator de profundidade (f_d).

Tabela 4. Resultados Obtidos para o Recalque do Solo Melhorado

f_d	n_2	s (m)
1,04	1,74	0,09

Com o tratamento do solo, o recalque total foi de 9 cm, estimado para ocorrer em 1 dia. Com o intuito de avaliar a eficiência do método, foi realizada a comparação desse valor com o de um recalque obtido com a utilização de uma sobrecarga de 1 m. Na solução com sobrecarga, para o mesmo aterro hipotético, foi obtido um recalque por adensamento de 88 cm (correspondente a aproximadamente 90% do adensamento), o qual levaria cerca de 38 dias para estabilizar.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como finalidade aplicar o método de Priebe para o dimensionamento de colunas de brita com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do solo da fundação, diminuir o recalque total e o seu tempo de ocorrência, para um aterro hipotético de 5 m de altura, assente sobre um solo mole localizado no município de Paulo Lopes/SC.

A caracterização geológico-geotécnica do solo de fundação do aterro foi realizada a partir de ensaio CPTu e ensaio de palheta (*Vane Test*). No CPTu foi identificada uma camada de solo mole de 4,50 m a partir do terreno natural, com uma resistência não drenada (S_u) de 23,00 kPa obtida no ensaio de palheta. O peso específico de 14,60 kN/m³ e módulo de elasticidade de 2,97 MPa foram obtidos a partir dos dados do CPTu.

Com base nesses dados do solo de fundação, foi realizado o dimensionamento das colunas de brita, empregando malha quadrada. As colunas foram dimensionadas com diâmetro de 0,80 m e espaçamento de 1,50 m. Para um fator de melhoria (n_2) de 1,74, foram obtidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico do solo melhorado ($\bar{\varphi} = 19^\circ$, $c' = 13,71$ kPa, $\gamma = 15,80$ kN/m³) e foi estimado um recalque total de 9 cm, com tempo de ocorrência em 1 dia.

A solução adotada promoveu ganhos consideráveis nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico do solo da fundação, resultando em análises de estabilidade com fatores de segurança adequados e compatíveis com os critérios recomendados pela ABNT NBR 11682 (2009). O recalque total foi de pequena magnitude e ocorreu em um período significativamente curto.

Dessa forma, conclui-se que a técnica de colunas de brita, dimensionada com base no método de Priebe, mostrou-se uma solução eficaz para a estabilização do aterro hipotético avaliado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à empresa Nova Engevix Engenharia pela disponibilização dos dados de ensaio utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- de Jesus, J. J. (2022). *Desempenho de aterro sobre solo mole melhorado pela técnica de colunas granulares: simulação numérica e análise paramétrica*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 137 p.
- de Oliveira, H. M. (2006). *Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados à ruptura*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 495 p.
- Priebe, H. J. (1995). The design of vibro replacement. *Ground Engineering*, Dez. 1995. Disponível em: <https://www.keller.com/sites/keller-group/files/2020-08/vibro_replacement_priebe.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. (2012). *Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*. São Paulo: Oficina de Textos, 320 p.
- Wildner, W. et al. (2014). *Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina*. Porto Alegre: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Escala 1:500.000.