



Soluções Adotadas para o Reforço de Fundações com Estacas Raiz: obra em Biguaçu – SC

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

Diego Cesar Sanchez

Engenheiro civil, CGT Eletrosul – Eletrobras, Florianópolis, Brasil, civildcs@yahoo.com.br

RESUMO: O artigo aborda as soluções adotadas para a correção dos problemas geotécnicos observados em diferentes fases de uma obra construída no Município de Biguaçu – SC. As causas desses problemas foram investigadas através de inspeções técnicas, investigações geotécnicas e monitoramento de comportamento das estruturas. Dentre os problemas apresentados no artigo, destacam-se a ruptura do solo durante a execução do aterro e os recalques diferenciais e uniformes nos elementos estruturais. A baixa resistência e a elevada compressibilidade da camada argilosa, o não reforço prévio do solo antes da execução do aterro e o erro na interpretação dos resultados das sondagens foram apontados como as principais causas dos problemas geotécnicos. As técnicas alternativas que poderiam ser utilizadas previamente à execução do aterro foram discutidas, assim como as soluções propostas e adotadas para a correção dos problemas geotécnicos. As soluções de vigas de reforço e estacas raiz foram eficientes e conseguiram estabilizar recalques das bases dos equipamentos durante a execução dos mesmos, como foi ilustrado nos resultados de monitoramento. As intervenções feitas garantiram a integridade dos elementos estruturais e o bom funcionamento dos equipamentos instalados e das vias internas da obra. As análises e as soluções apresentadas podem ser de grande relevância na abordagem dos problemas geotécnicos similares.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Moles, Recalque, Reforço de Fundação, Estaca Raiz, Investigação Geotécnica, Biguaçu.

ABSTRACT: The paper addresses the solutions adopted for the correction of geotechnical problems observed in different phases of a work built in the municipality of Biguaçu - SC. The causes of these problems were investigated through technical inspections, geotechnical investigations and monitoring the behavior of the structures. Among the problems presented, the soil failure during the execution of the embankment and the differential and uniform settlements in structural elements stand out. The low strength and high compressibility of the clay layer, the lack of previous soil reinforcement before the embankment execution, and the error in interpreting the boring results were pointed out as the main causes of the geotechnical problems. Alternative techniques that could be used before the execution of the embankment were discussed, as well as the proposed and adopted solutions to correct the geotechnical problems. The solutions of reinforcement beams and root piles were efficient and managed to stabilize settlements at the bases of the equipment during their execution, as illustrated in the monitoring results. The interventions carried out ensured the integrity of the structural elements and the proper functioning of the equipment and the internal roads of the work. The analyses and solutions presented can be of great relevance in addressing similar geotechnical problems.

KEYWORDS: Soft Soils, Settlement, Foundation Reinforcement, Root Pile, Geotechnical Investigation, Biguaçu.



1 Introdução

A costa brasileira é caracterizada por possuir áreas com espessos depósitos de solos compressíveis e de baixa capacidade de suporte, em geral de origem fluviomarinha, que impõem severos desafios à engenharia. Portanto, a execução de obras seguras, econômicas, eficientes e sustentáveis em cima desses depósitos depende da qualidade de investigação geotécnica, das características dos solos, além dos prazos construtivos, métodos de dimensionamento e técnicas executivas adotadas.

Em termos construtivos, a execução de grandes obras de engenharia sobre solos moles é precedida geralmente pela construção de aterros para acelerar o recalque e aumentar a resistência do solo, como também da utilização de outras técnicas, tais como drenos verticais, geossintéticos e elementos verticais (Almeida e Marques, 2014).

O dimensionamento e o bom desempenho das técnicas supracitadas estão associados ao comportamento do solo. Assim sendo, é considerando ainda que o solo é o meio que vai suportar as cargas, sua identificação e caracterização de comportamento são essenciais à solução de qualquer problema. Inclusive, as das patologias decorrentes de incertezas quanto às condições do subsolo, sendo que estas incertezas devem-se principalmente a simples ausência de investigação, investigação ineficiente e com falhas ou má interpretação dos resultados das sondagens (Milititsky et al., 2015).

Nesse contexto de patologias, o presente artigo se propõe a analisar os problemas geotécnicos observados em uma obra e apresentar as principais soluções propostas e adotadas para a correção dos mesmos, com destaque para o reforço dos elementos de fundação com vigas de reforço e estacas raiz.

2 Características da Obra

2.1 Caracterização Geotécnica

A obra em estudo (Figura 1) foi construída em uma área de aproximadamente 113.000 m², no Município de Biguaçu-Santa Catarina, a 200 metros da rodovia SC 408, destinada a instalação de equipamentos para a transformação e transmissão de energia elétrica. O local possui relevo plano, com formação geológica de planícies fluviais. À semelhança de grande parte da planície litorânea brasileira, o solo da região é caracterizado como solo mole de origem aluvial, resultante da ação de fluxos gravitacionais e aluviais de transporte de material das vertentes.

O comportamento do subsolo foi investigado através dos ensaios de caracterização física, 8 ensaios de adensamento, 10 ensaios CPTu com medições de dissipação do excesso de poropressão, além de 62 ensaios SPT realizados em diferentes fases da obra. Estes ensaios permitiram tanto a caracterização do subsolo e identificação do nível de água, como a obtenção dos parâmetros de projeto.



Figura 1. Localização da Obra (Google Earth).

As sondagens identificaram a presença de uma camada de aterro de argila com areia média, pouco siltosa, de cor vermelha com espessura variando entre 1,5 m a 3,0 m, construída antes do início da obra. Abaixo do aterro, foi identificada uma camada de espessura variável entre 2,5 m e 8,0 m, formada de argila



arenosa saturada, pouco siltosa e com presença localizada de matéria orgânica. Ademais, a argila apresenta consistência mole a muito mole (N_{spt} entre 0 e 10), baixo peso específico, elevada compressibilidade, elevado teor de umidade, elevado índice de vazios (Tabela 1). A espessura da camada seguinte, composta pela mistura de areia e frações de silte, argila pedregulhos e matações, varia entre 2,0 m e 5,0 m. A camada mais profunda, que se estende até a profundidade de 19,2 m, é formada essencialmente pela mistura de areia e alteração de rocha.

Tabela 1 – Principais parâmetros da argila mole.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	Faixa de Variação
Umidade natural - w (%)	98,26	16,14	73,90 – 120,90
Peso específico natural - γ_n (kN/m ³)	14,19	0,68	13,52 – 15,54
Índice de vazios inicial - e_0	2,64	0,33	2,10 – 3,02
Tensão de pré-adensamento - σ'_{vm} (kN/m ²)	35,38	15,88	11,0 – 52,0
Razão Sobre Adensamento - OCR	2,42	1,37	0,59 – 3,96
Índice de compressão - C_c	0,95	0,18	0,74 – 1,26
Índice de recompressão - C_r	0,22	0,13	0,08 – 0,42
Coeficiente de permeabilidade vertical - C_v (m ² /ano)	1,42		

2.2 Estrutura da Obra

A obra em questão foi inaugurada em 2008 e nela foram instalados equipamentos para proteção, controle, transmissão e distribuição de energia de alta potência. Tendo em conta a grande sensibilidade desses equipamentos e a necessidade do funcionamento contínuo dos mesmos, é importante a utilização de fundações capazes de proporcionar pequenos valores de recalque.

Esses requisitos técnicos aliados às características do solo motivaram a utilização de fundação profunda, que consiste em estacas de concreto pré-moldadas com comprimento cravado entre 16,5 m e 30 m e seções transversais quadradas de 165 mm, 185 mm e 205 mm, projetadas para suportar as cargas de 10 t, 20 t e 35 t, respectivamente. Essas cargas são provenientes do peso próprio dos cabos, equipamentos e suportes utilizados. Luvas metálicas simples foram utilizadas para emendar estacas, em situações onde o comprimento de cravação é maior que 10 m.

Com relação ao posicionamento das bases das estacas, os resultados de cravação indicaram que as mesmas foram apoiadas na camada mais resistente abaixo da camada de solo mole. Ainda, foram executadas vigas de travamento de concreto para interligar os blocos sobre estacas de modo a garantir rigidez ao conjunto e minimizar a possibilidade de deslocamentos laterais e verticais.

2.3 Descrição do Problema da Obra

As primeiras rupturas observadas no corpo do aterro e na camada da argila mole (Figura 2) ocorreram em 2007, durante as fases de terraplenagem e execução do aterro. Salienta-se que o aterro foi construído diretamente sobre a camada de argila mole, sem a instalação prévia de drenos verticais para acelerar o adensamento primário ou de elementos de reforço para evitar rupturas na camada do solo mole de baixa resistência. A execução do aterro e da obra durou aproximadamente 6 meses.



Figura 2. Ruptura do solo do aterro e da argila mole durante a terraplenagem e execução do aterro.

Em setembro de 2009, após a conclusão e inauguração da obra, foi realizada uma visita técnica ao local, pelos responsáveis pela obra, que observaram a ocorrência de recalques causados pelo adensamento de argila ao redor das vigas de travamento e ao longo do aterro do pátio. Posteriormente, inspeções técnicas detalhadas foram feitas nas estruturas das fundações, vigas de equilíbrio e suportes dos equipamentos a fim de mapear e analisar as causas dos problemas verificados. Tais inspeções consistiram em levantamentos visuais e em medições dos desníveis através de prumos, trenas e mira laser.

Os resultados dessas inspeções detectaram distorção angular maior que 2% em algumas estruturas, recalques uniformes e diferenciais, movimentos horizontais de barras e desnivelamentos entre o topo de suportes de equipamentos pertencentes à mesma base (Figura 3). Também foi constatado desalinhamento longitudinal das barras rígidas devido ao movimento dos suportes de concreto. Como frisado anteriormente, inclinações e recalques diferenciais excessivos devem ser evitados, uma vez que podem provocar esforços adicionais nas estruturas, além de comprometer a comunicação entre os equipamentos.



Figura 3. Recalque diferencial das bases dos armários e aferição de desaprumos em estruturas de suporte.

Por amostragem, as estruturas das bases dos suportes de equipamentos foram inspecionadas com a finalidade de verificar a integridade das ligações rígidas destes com os nichos das bases de fundação. Tais inspeções não identificaram muitos problemas de integridade estrutural, além de recalques das estruturas de suporte de barramento, ruptura das canaletas de cabos e a ocorrência de pequenas cavidades ocas com mais de 10 cm de profundidade (Figura 4).



Figura 4 – Recalque diferencial na canaleta de cabos e cavidades na camada superficial.

Os problemas supracitados ocorreram em todos os setores compreendidos na área da obra. Enfatiza-se que, em consequência dos recalques uniformes e diferenciais, os principais problemas constatados na obra foram o desaparecimento de suportes, exposição das bases de fundações, rompimento de eletrodutos por tensionamento, rupturas superficiais do subleito e irregularidades na espessura da camada de brita. Em decorrência disto, vários procedimentos rotineiros de manutenção e operação foram comprometidos, devido à dificuldade de acesso e circulação de caminhões nas vias internas ao pátio.

3 Análise dos Problemas e Soluções Geotécnicas Propostas

3.1 Análise dos Problemas

As análises geotécnicas e estruturais realizadas buscaram investigar as causas dos problemas observados e mapear os danos estruturais. Os resultados do estudo corroboram as conclusões preliminares que indicaram o adensamento da camada de argila mole como a principal causa dos movimentos horizontais, rotações e recalques observados nos elementos estruturais, nos equipamentos instalados e no aterro do pátio. Os recalques por adensamento se devem a gradual dissipação de poropressão acompanhada pela saída de água dos vazios do solo. Esse fenômeno iniciou com a execução do aterro e ocorreu de forma contínua, tendo sido responsável pelas deformações na massa do solo ao longo do tempo. Por outro lado, as investigações realizadas antes do início da obra e a sua interpretação foram ineficientes na identificação da variabilidade do solo ao longo da profundidade. Em razão disso, ensaios adicionais foram realizados e estes indicaram a presença de pedregulhos e matacões em uma camada mais profunda, situação que não havia sido identificada em sondagens anteriores.

Com relação aos elementos da fundação, as análises preliminares revelam que os afundamentos na camada superficial do solo, ao redor das vigas de travamento e dos elementos rígidos de concreto armado, estão relacionados à falha na interpretação dos resultados de SPT e ao atrito negativo ocorrido com o afundamento do solo. Camadas de areia com pedregulhos e matacões foram erroneamente consideradas como camada impenetrável. Sendo assim, estacas foram apoiadas nessas camadas, sem o comprimento suficiente para absorver as cargas externas a que foram submetidas. Em relação ao atrito negativo, Décourt (1998) explica que este ocorre geralmente quando estacas são cravadas em solos moles compressíveis sob aterros recentes, tendo as suas pontas apoiadas em solos mais resistentes.

A análise posterior, que considerou diferentes perfis de solo, estimou recalques totais variando de 5 a 120 cm, com previsão de ocorrência no período entre 0,2 a 9,6 anos após a conclusão do aterro. Dependendo do perfil analisado, notou-se que cerca de 75% desses recalques ocorreriam entre 1 mês a 2,57 anos. Na mesma análise, foi prevista recalque médio superior a 36 cm no centro das bases até o final da execução da obra em 2007. Confrontando os resultados das estimativas de recalque com o mapeamento das patologias, verificou-se que a ocorrência significativa de recalque foi no centro das bases, onde foram constatados os problemas estruturais com medição de recalques de até 73 mm.

Os resultados da análise indicaram ainda problemas de instabilidade em alguns perfis analisados ($FS < 1$), destacando-se assim a necessidade da redução da altura do aterro, da instalação de drenos verticais ou da execução de elementos de reforço previamente a execução do aterro, de modo a evitar rupturas localizadas e recalques excessivos da camada do solo mole.



3.2 Soluções Geotécnicas Propostas

As soluções geotécnicas propostas basearam-se no mapeamento das patologias, na relevância do empreendimento, na sensibilidade dos equipamentos e nas características dos solos. As primeiras soluções propostas para a análise dos problemas estruturais foram a abertura de poços de inspeção próximos das cavidades com carreamento de solo, canaletas, bases de suportes de equipamentos, vigas de fundações e locais de ligação com estacas, entre outras.

Para a regularização superficial das plataformas dos pátios e alinhamento das bases dos equipamentos, foi indicado o preenchimento das cavidades com areia saturada, uma vez que se trata de um material auto-adensável, além do reperfilamento e compactação da camada superficial e reposição da camada de brita, em conformidade ao projeto executivo inicial. Também foi proposta a execução de vergas para nivelamento das canaletas e das tampas das caixas de passagem.

As principais soluções geotécnicas visaram garantir a conformidade dos sistemas civis e retificação dos problemas apresentados e consistiram na instalação de instrumentação para monitorar a variação de recalques ao longo do tempo. A resolução proposta para o aterro do pátio foi a instalação de marcos de concreto ou pinos metálicos soldados e marcos de referência para o monitoramento de deslocamentos verticais e desaprumos, respectivamente. Por fim, foi recomendada a execução de estacas raiz nas bases dos equipamentos com problemas de recalque.

4 Resultados das Intervenções

O monitoramento dos recalques, iniciado em novembro de 2009, consistiu-se no levantamento de 4 linhas de colunas (2 linhas barramento P e 2 linhas barramento PT) situadas na área das bases dos equipamentos, sendo que essas são perpendiculares aos eixos 1F, 1H e 1I, que passam pelas colunas. Cada coluna possui dois pontos de observação, colocados a 20 cm e 466 cm da base.

A Figura 5 apresenta a evolução de recalque nas linhas dos barramentos P e PT. O mês 0 (zero) corresponde ao início do monitoramento (novembro de 2009). Recalques de até 7 cm foram observados no eixo I das linhas de ambos barramentos durante os 10 meses de monitoramento. No eixo H, foram observados recalques de 4 cm apenas na linha do barramento P. As linhas do eixo H e e linha do barramento PT do eixo H não recalçaram consideravelmente em relação aos demais.

A soma dos recalques medidos nas estruturas com os sofridos pelas mesmas antes do início do monitoramento é elevada e sinaliza uma condição crítica, com possibilidade de gerar esforços residuais que superam a capacidade portante dos materiais, provocando assim o colapso das estruturas.

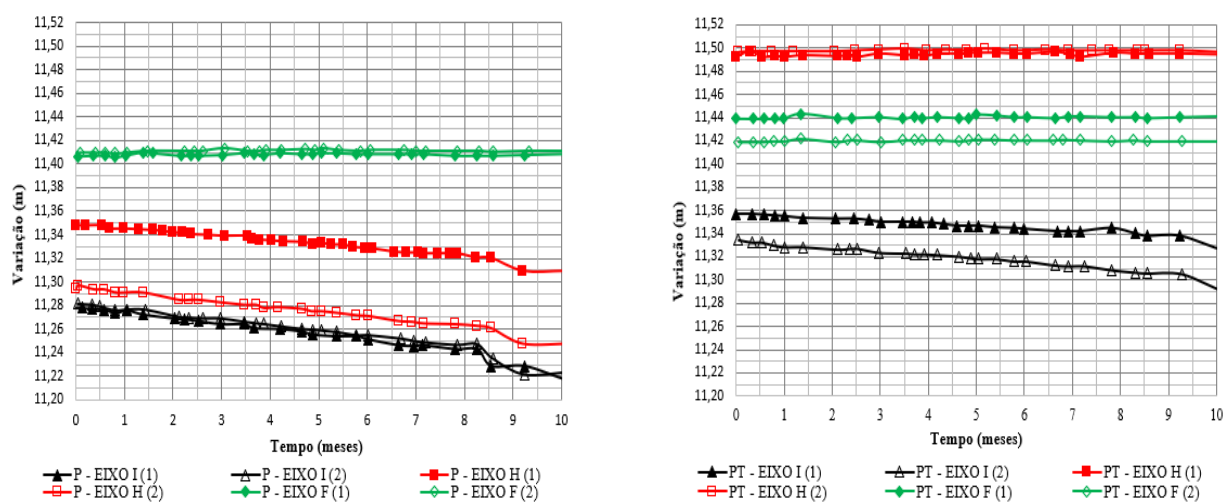


Figura 5 – Evolução de recalque ao longo dos 10 meses de monitoramento inicial.

Para estabilizar ou minimizar a taxa de recalque e evitar o possível colapso, as estruturas de concreto e das fundações dos barramentos foram reforçadas. O reforço (Figura 6) consistiu não somente na execução de cinco vigas com seção transversal de 70×70 cm abaixo das bases dos equipamentos, mas também de estacas



raiz com diâmetro de 30 cm e comprimentos suficientes para atravessar camadas com pedregulhos e matacões e apoiar suas bases na rocha sã, aproximadamente 20 metros abaixo do nível do terreno. Essas intervenções iniciaram em agosto de 2010 e duraram aproximadamente 4 meses.



Figura 6 - Detalhes da execução da forma da viga de reforço e da estaca raiz.

A Figura 7 ilustra a variação dos deslocamentos medidos em função do tempo, considerando que o monitoramento iniciado antes da instalação dos elementos de reforço permaneceu durante e após a execução desses elementos. Os resultados sinalizam a redução da taxa de recalque já nos primeiros meses da execução dos elementos de reforço. Findada a execução destes, verifica-se uma estabilização, quase total, dos recalques nos eixos de todas as linhas de barramentos, evidenciando a eficiência das soluções adotadas.

Por fim, foi realizado ainda o ensaio de esclerometria para avaliar a resistência do concreto dos elementos estruturais. O resultado do ensaio apresentou índices esclerométricos (37,7) superiores ao índice mínimo aceitável (34) para concretos com f_{ck} igual a 25 MPa.

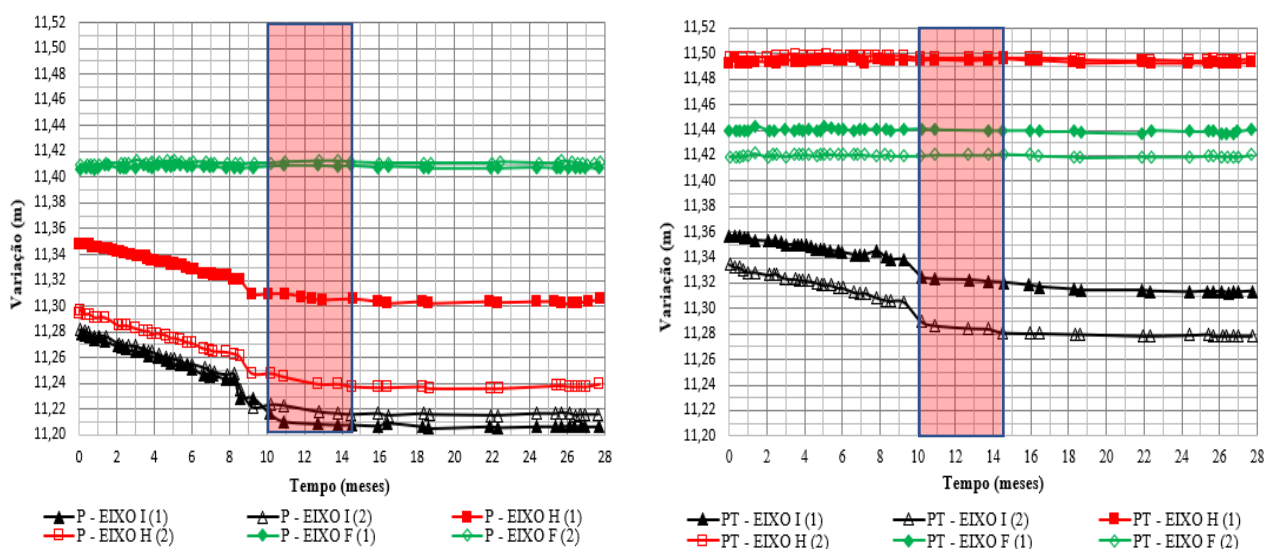


Figura 7 – Evolução de recalque ao longo dos 28 meses de monitoramento – antes, durante e após o reforço.

5 Conclusão

A partir dos resultados das investigações geotécnicas, inspeções técnicas e monitoramento, o presente artigo analisou as principais causas dos problemas geotécnicos observados em uma obra construída no Município de Biguaçu – SC e apresentou as soluções adotadas para a correção dos mesmos.

As análises apresentadas e discutidas apontaram a necessidade de utilização de drenos verticais ou de materiais de reforço no solo antes da construção do aterro, considerando que as rupturas observadas na obra devem-se à baixa resistência da camada argilosa. Investigações geotécnicas classificaram o material dessa



camada como argila arenosa saturada com consistência mole a muito mole, baixo peso específico, elevada compressibilidade, elevado teor de umidade e elevado índice de vazios. Análise de compressibilidade realizada na camada, por meio de previsões e medições, apresentou elevados valores de recalques, com possibilidade de comprometer a estabilidade das estruturas e o funcionamento do empreendimento.

Problemas diversos - distorção angular maior que 2% em algumas estruturas, recalques uniformes e diferenciais, desnivelamentos e movimentos horizontais de barras – foram causados pelo adensamento primário da camada argilosa e pela falha na interpretação dos resultados das sondagens. A estabilização dos recalques foi decorrente ao emprego de vigas de reforço e estacas raiz construídas nas bases dos equipamentos, soluções essas adotadas à luz das informações advindas das investigações geotécnicas complementares e do monitoramento realizado.

Por fim, destaca-se que a análise do problema com base nos resultados das investigações geotécnicas, inspeções técnicas, monitoramento e estimativas de recalque foi essencial para a definição das soluções utilizadas, que mostraram ser eficientes para a garantia da integridade dos elementos estruturais, assim como do bom funcionamento dos equipamentos instalados e das vias internas da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M.S., Marques, M.E.S. Aterro sobre solos moles: projeto e desempenho. 2. ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- Décourt, L. (1998). Análise e Execução de Estacas Profundas. In W. HACHICH et al. (eds.), Fundações: Teoria e Prática, 2 ed., Editora Pini, São Paulo, 265-302 p
- Milititsky, J., Consoli, N., Schnaid, F. Patologia das Fundações. 2. ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2015.