

Metodologia Executiva de Colunas de Brita Injetadas com Nata de Pega Rápida para Reforço de Fundações de Barragem de Rejeitos

Fabio Brumano

Gerente Técnico-Comercial, Tecnogeo Ground, São Paulo, Brasil, fabio.brumano@tecnogeo.com.br

Marcelo Felix dos Santos

Diretor Técnico-Comercial, Tecnogeo Ground, Rio de Janeiro, Brasil, marcelo.felix@tecnogeo.com.br

Rafael Oliva

Diretor de Obras, Tecnogeo Ground, São Paulo, Brasil, rafael.oliva@tecnogeo.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a metodologia desenvolvida para a execução de colunas de brita injetadas para o reforço de fundação de uma barragem de rejeitos com alteamento de 84m onde foi necessária a formulação de diferentes traços de caldas de cimento e natas de pega rápida, visando impedir o fluxo de água através das colunas de brita. A análise inicial do subsolo evidencia a intrincada complexidade associada à instalação de associada fundação, enfatizando a presença de solos moles e fofos, aliada ao fenômeno de artesianismo. Essas características geotécnicas específicas foram cruciais para o desenvolvimento da solução aplicada. A estratégia adotada de colunas de brita injetadas por via dupla será discutida como uma solução adaptativa para lidar com as subsolo incomum. Também serão destacados os desafios enfrentados e as soluções específicas desenvolvidas. Um estudo de caso foi utilizado de maneira abrangente para ilustrar a aplicação prática abordada, fornecendo *insights* valiosos sobre a eficácia da técnica em condições geotécnicas adversas. O artigo conclui reforçando a importância de considerar as características geotécnicas específicas do local ao desenvolver estratégias de reforço de fundações de similar complexidade.

PALAVRAS-CHAVE: Colunas de Brita Injetadas, Melhoramento de solo, Reforço de Fundações, Barragem de Rejeitos, Nata de Pega Rápida.

ABSTRACT: This paper presents the methodology used for the execution of injected stone columns to reinforce the foundations of a tailings dam where it was necessary to formulate different mixes of cement grouts and quick-setting slurries, aiming to prevent water flow through the stone columns. The initial analysis of the subsurface highlights the intricate complexities associated with foundation installation, emphasizing the presence of soft and loose soils, coupled with the artesian flow. These specific geotechnical characteristics were crucial for the development of the applied solution. The adopted strategy of two-way injected stone columns will be discussed as an adaptive solution to deal with the unusual subsurface conditions. The challenges faced and specific solutions developed will also be highlighted. A comprehensive case study was used to illustrate the practical application discussed, providing valuable insights into the effectiveness of the technique under adverse geotechnical conditions. The paper concludes by reinforcing the importance of considering the specific geotechnical characteristics of the site when developing foundation reinforcement strategies.

KEYWORDS: Injected Stone Columns, Soil Improvement, Foundation Reinforcement, Tailings Dam, Quick Set Slurry.

1 INTRODUÇÃO

Durante o processo de construção de uma barragem de rejeitos em Minas Gerais, identificou-se a existência de solos com baixa capacidade de suporte e compressíveis na área a jusante do paramento e ainda sob a projeção do futuro barramento. A construção do maciço foi segmentada em duas fases principais: a inicial e a final. Durante a fase de construção do maciço inicial, adotou-se a técnica de CCP (Cement Churning Pile) – tecnologia da família do *Jetgrouting* – para o reforço desta região de solo de baixa resistência. Esta

solução se mostrou eficaz na região, com sua performance validada por meio de coletas de amostras frescas, por sondagens rotativas, ensaios de Cross Hole dentre outros.

À medida que os estudos progrediram na área a jusante do barramento, detectou-se zonas com fluxo horizontal de água na interface entre o solo e o maciço rochoso, além da presença de artesianismo. Nessa área mais distante do maciço inicial, porém ainda na região do maciço final, duas regiões críticas foram identificadas, necessitando de reforço no solo.

Na Área 1, foi encontrada uma zona com um perfil geológico-geotécnico onde solos de baixa resistência se intercalavam com camadas de metadolomito rochoso e saprólito. O solo residual de metadolomito, caracteristicamente fofo, podia estender-se a profundidades que ultrapassavam os 35 m em relação à superfície do terreno.

Já na Área 2, o perfil caracterizava-se por ser mais uniforme, com o topo rochoso situado em profundidades inferiores a 20 m. Essa área era composta por uma sequência que iniciava com solo residual de filito brechado mole, seguia por solo residual de metadolomito fofo com espessura variando em torno dos 4 m e culminava no maciço rochoso de metadolomito com uma superfície fraturada que se estendia como uma capa de espessura também de 4 m.

Colunas teste de CCP foram implantadas com a intenção de se apoiar no maciço rochoso. Porém, durante a construção, observou-se perda d'água durante a perfuração e perda de refluxo de calda durante a injeção, fenômenos atribuídos às fissuras na rocha e também ao fluxo de água no metadolomito fofo.

Visando aprimorar estas áreas para suportar as cargas do maciço final, várias técnicas de melhoria do solo foram testadas. O método CCP foi abandonado devido à ineficiência causada pela perda de material e pela incapacidade de estabelecer contato com a rocha. Seguiram-se outros testes, que também se mostraram ineficazes devido às peculiaridades do subsolo.

O uso de estacas raiz foi rapidamente descartado, pois o peso da argamassa gerava empuxo suficiente para desestabilizar a estrutura do metadolomito fofo, impedindo a formação da estaca. O mesmo problema ocorreu com as estacas hélice contínua. Ambas apresentavam perda de material para o solo a ponto de não se conseguir preencher o fuste por completo.

Finalmente, optou-se por colunas de brita vibrocompactadas pelo método *bottom-feed*. Este procedimento não apresentou o abatimento do fuste durante ou após a execução, revelando-se uma solução viável para o reforço do solo desde que as vibrações induzidas no solo fossem mínimas evitando assim qualquer incremento no potencial de liquefação. Testes sísmicos foram executados e evidenciou-se que a perturbação no solo era desprezível e comparável às vibrações de tráfego na plataforma de trabalho, viabilizando assim a vibrocompactação pelo método *bottom-feed* como solução viável. No entanto, devido às propriedades drenantes das colunas de brita, sua aplicação foi limitada, pois o fluxo constante de água no subsolo poderia transportar partículas, criando vazios e potencial risco de colapso.

Para contornar a percolação de água pelas colunas de brita, desenvolveu-se, em colaboração entre executor, projetista, consultores, *checker* de projeto e a mineradora, a técnica de colunas de brita injetadas com calda de cimento. Esta abordagem inovadora no Brasil exigiu características especiais, que foram aperfeiçoadas através de testes laboratoriais e de campo até a implementação final na obra.

As colunas injetadas requeriam uma mistura de pega rápida para evitar a dispersão no solo devido ao fluxo de água constante, e a calda de cimento não poderia ser mais rígida que uma coluna de brita tradicional. Isso implicou na utilização de aditivos e ajuste na proporção de cimento e bentonita para atenuar a resistência da calda.

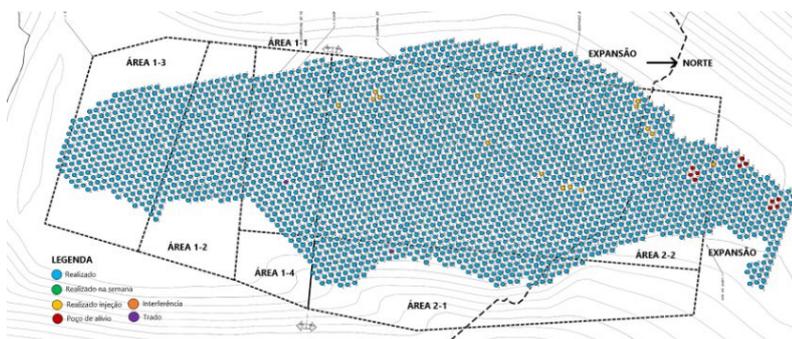


Figura 1a – Distribuição das colunas por área | Figura 1b – Local de instalação das colunas de brita injetadas.

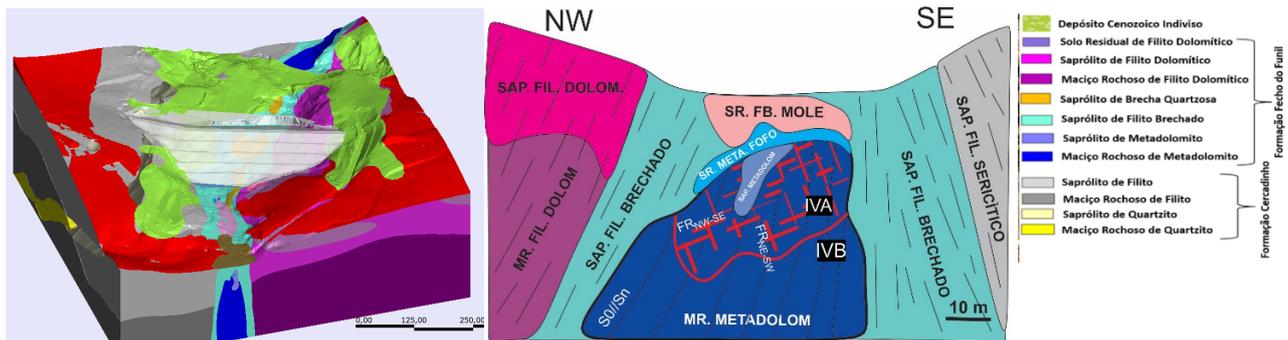


Figura 2 – Representação 3D e perfil geológico predominante à jusante da barragem (DF+)

3 COLUNAS DE BRITA INJETADAS

A técnica de colunas de brita injetada representa um avanço significativo na engenharia geotécnica para o reforço de solos com baixa capacidade de suporte. Embora seja uma prática estabelecida globalmente, sua aplicação no Brasil é inovadora e pioneira. O método construtivo consiste na inserção de material granular no solo, acompanhado pela injeção de uma calda cimentícia, que preenche os espaços entre material pétreo, aumentando a resistência à compressão das colunas e diminuindo sua permeabilidade.

O propósito dessas colunas é melhorar as propriedades do solo para suportar cargas de fundações diretas e distribuídas, como as de aterros e pavimentos de concreto.

Originada na Europa nos anos 1930, a vibrocompactação foi desenvolvida para compactar solos granulares não coesivos. Com o passar do tempo, a técnica evoluiu para incluir solos coesivos, dando origem às colunas de brita por vibrossubstituição. Ambos os métodos se baseiam na reorganização das partículas do solo em uma estrutura mais densa através da vibração.

A vibrossubstituição expande essa noção ao substituir o solo original por material granular de alta resistência, como brita, que é compactada em profundidade. Esse processo compacta o solo e também melhora suas características mecânicas.

Com a necessidade de colunas mais robustas para solos extremamente compressíveis, surgiram técnicas complementares, como as colunas de brita injetadas com caldas de cimento e bentonita, e as colunas de brita concretadas.

As colunas de brita injetadas são particularmente benéficas em solos de baixa capacidade, proporcionando melhorias significativas e estabilidade para os aterros. Sua baixa permeabilidade previne a transformação em drenos verticais, uma vantagem adicional neste projeto.

3.1 Layout e Distribuição das colunas

O design propunha uma disposição triangular das colunas, espaçadas a cada 1,40 m, com diâmetro nominal de 80 cm com um pé alargado para tentar substituir ao máximo do solo fofo de metadolomito. A profundidade máxima seria de 20 m, limitada pela capacidade dos equipamentos de perfuração. Na Área 1, com solos compressíveis estendendo-se além de 20 m, uma injeção de consolidação foi planejada até a cota -18 m para preparar a instalação das colunas de brita. Na Área 2, com rocha mais superficial, as colunas foram instaladas conforme o padrão.

As injeções de consolidação merecem atenção especial e serão tema de trabalhos futuros.

3.1 Nata de Pega Rápida

A formulação da nata de pega rápida exigiu vários testes de traço, iniciando no laboratório da TecnoGeo Ground e prosseguindo para testes de campo, ajustando a mistura para as condições operacionais. Um sistema de injeção por duas vias foi desenvolvido, pois se viu a necessidade da utilização de traços bicomponentes.

Diversas composições foram testadas, destacando-se o NPR da CGC e o Montan Grout da MC Bauchemie, ambos com tempos de pega adequados e aprovados para uso em campo. Com efeito, os dois produtos foram aplicados durante a execução do projeto.



Figura 3. Mistura, preparo e determinação de *gel time* em laboratório.

3.3 *Gel Time*

Os critérios de aceitação para o tempo de gelificação variaram entre o NPR e o Montan Grout devido às diferenças nos processos de endurecimento. O NPR forma um gel rígido entre 2 a 3 minutos, enquanto o Montan Grout começa a gelificar imediatamente após a mistura, mantendo-se fluido e ganhando viscosidade gradualmente, resistindo à lavagem pelo fluxo de água subterrâneo após menos de 5 minutos.

3.2 *Resistência a Compressão Simples*

A resistência da calda foi restrita a uma faixa entre 0,75MPa e 1,5MPa com uma margem de desvio muito restrita:

Tabela 1. Faixa limite de variação das resistências da nata de pega rápida.

Faixa	Máximo Permitido
Até 0,50 MPa e acima de 2,00 MPa	10%
0,51 a 0,75 MPa e 1,51 a 2,00 MPa	20%

4 METODOLOGIA EXECUTIVA

4.1 *Construção Típica*

As etapas a seguir descrevem o procedimento executivo das colunas de brita injetadas:

4.1.1 *Pré-furo*

Devida à necessidade de melhoramento de solo sobretudo na região do solo de metadolomito fofo e no contato entre o solo e a rocha A metodologia executiva das colunas de brita injetadas neste projeto demandou da realização de pré-furos utilizando trados do tipo hélice contínua até o atingimento da rocha.

Além disso, durante a perfuração, informações críticas como coordenadas, profundidade, diâmetro e quaisquer anomalias ou interrupções foram registradas e informadas à fiscalização. Em situações onde as colunas de brita não atingiram a profundidade final prevista, foi necessário retomar o uso do pré-furo. Em áreas onde o avanço do pré-furo foi impedido por zonas impenetráveis, como o topo rochoso de metadolomito, procedeu-se com o preenchimento da rocha dolomítica por meio de vibrocompactação em etapas menores, criando uma base alargada para o preenchimento adequado do topo rochoso.

4.1.2 *Posicionamento e Perfuração*

A topografia deve marcar os pontos a serem executados de acordo com o projeto executivo. Os pontos marcados também devem ser encontrados nos desenhos de acompanhamento de execução através de sua

identificação própria, esses pontos devem ser marcados através da cravação de uma estaca de madeira no solo. Para formar uma coluna, o vibrador, acoplado ao seu tubo prolongador, é posicionado conforme a indicação topográfica. O sistema de vibração é iniciado e o vibrador é lentamente abaixado.

4.1.3 Descrição técnica das etapas de construção

4.1.4 Penetração no Solo

A ferramenta vibratória é introduzida no terreno até que alcance a nega ou a profundidade de projeto. Esta condição é aquela associada à máxima amperagem encontrada no gráfico e depende do tipo de vibrador utilizado.

O vibrador ultrapassa os estratos de solos de baixa resistência até a profundidade exigida no projeto executivo ou até a nega, auxiliado pelos mecanismos de vibração, pelo ar comprimido, pelo peso próprio da composição e pelo *pull-down* do equipamento.

O material é injetado no solo através da ponta do vibrador. O ar-comprimido com pressões de trabalho de pelo menos 0,5 kgf/cm² auxilia a injeção da brita e da nata de pega rápida;

4.1.5 Adição do Material

Com o auxílio de uma carregadeira, o material granular é despejado na caçamba elevatória do equipamento. Essa caçamba é elevada até a altura da tremonha, a brita é despejada e flui pelo tubo oval até alcançar o tubo de condução localizado no vibrador. Ao mesmo tempo, a nata de cimento e o componente acelerador de pega são preparados e bombeada para dentro do tubo de condução já na ponta inferior do vibrador. A brita e a nata de pega rápida são misturados momentos antes da saída da brita do vibrador e o início do processo de construção da coluna.



Figura 4 - Exemplo de equipamento - Vibrocator e central de mistura e injeção.

4.1.6 Vibrocompactação

Após alcançada a profundidade de projeto e/ou camada competente, o vibrador sobe e o material é injetado no solo. O vibrador é suspenso em etapas e o vazio criado pela sua subida é preenchido com o material da coluna. O vibrador, em seguida, penetra novamente no solo injetando o material e comprimindo-o radialmente no solo ao redor.

Este processo se provou necessário ser mais intenso na ponta da coluna, onde havia a ocorrência do metadolomito fofo e continuada com menor diâmetro até o topo. O diâmetro da coluna resultante depende da rigidez do solo ou densidade *in-situ* do solo ao redor (quanto menos competente for o solo, maior o diâmetro da coluna).

No caso da região entre o metadolomito fofo e a rocha dolomítica, os pés das colunas chegaram a tocar umas nas outras, tamanha a falta de resistência e frágil estrutura que compõe este solo.

O diâmetro da coluna construída pode ser estimado através do monitoramento do consumo de material durante a instalação. A compactação do solo é monitorada através da análise do repouso do vibrador

(perfuração do solo) e os picos de amperagem. Os picos informam de forma indireta a resistência de penetração e a compactação exercida no agregado, pelos movimentos de subida e descida.

A ferramenta de vibração é um longo e pesado tubo acoplado ao vibrador, que é movido por um motor elétrico. Portanto, a magnitude da amperagem atribuída ao motor elétrico indica a resistência que o vibrador encontra quando está penetrando no solo e quando alcança a nega durante a instalação da coluna.

4.1.7 Conclusão das colunas

Essas etapas de adição de material e compactação se repetem sucessivamente até que a coluna formada alcance a cota da superfície da plataforma de trabalho. Diferentemente de outras tecnologias testadas, a CBI – Coluna de Brita Injectada não evidenciou abatimento durante a fase construtiva.

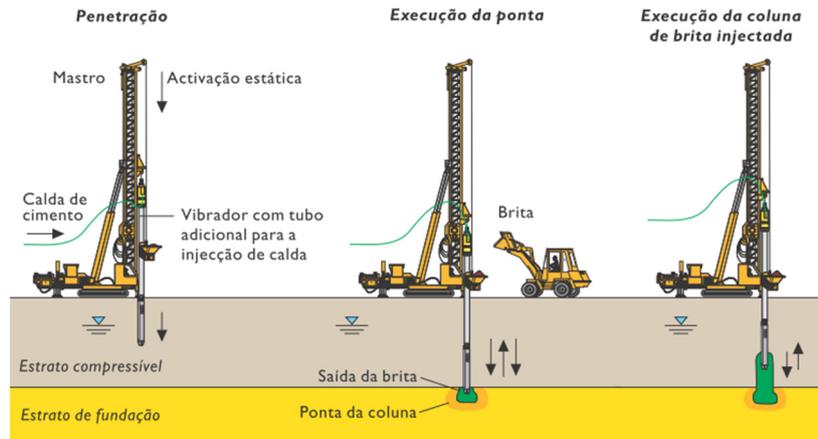


Figura 5 - Representação das etapas do processo executivo (cortesia: Tecnogeo Ground)

4.2 Processos de controle de qualidade e de execução

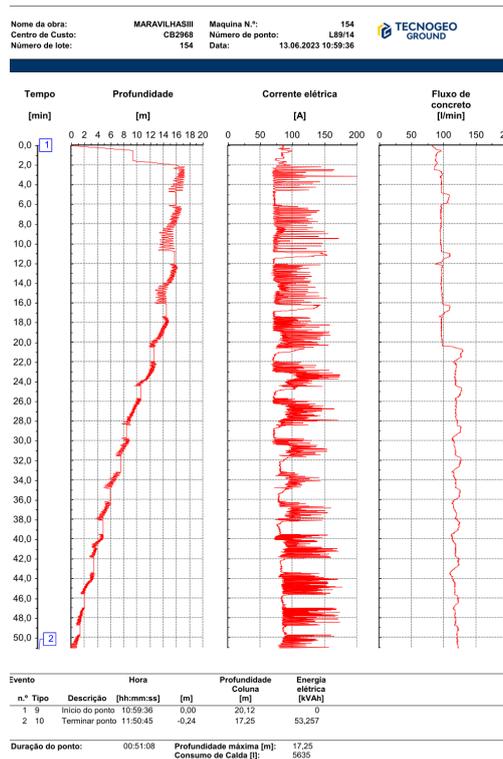


Figura 6 - Protocolo de registro gráfico

O monitoramento de instalação das colunas é realizado através de registro computadorizado automático, chamado M5. Este instrumento fornece um registro automático da execução, em forma de um protocolo gráfico de profundidade versus tempo, consumo elétrico (esforço de compactação) versus tempo e consumo de nata de cimento. A informação inclui:

- número de referência da coluna;
- data e hora da instalação;
- tempo necessário para a instalação;
- máxima profundidade atingida;
- esforço de compactação durante penetração e processo de compactação;
- Consumo de calda;

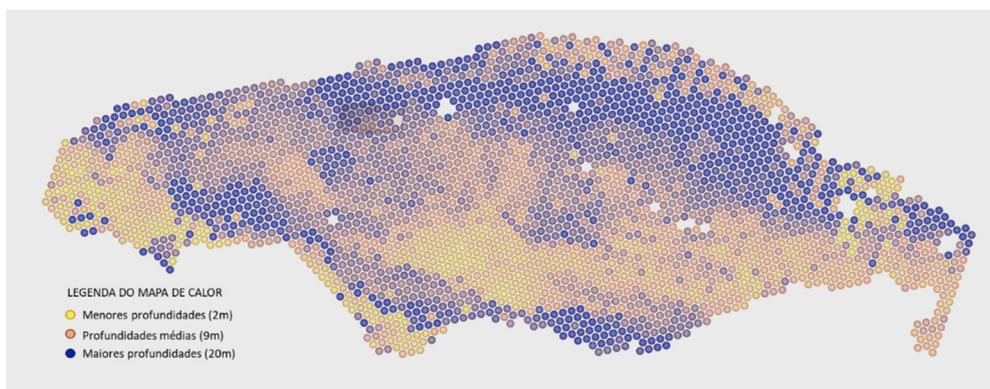
Estes protocolos gráficos registram de forma automática os dados advindos do processo de execução de cada coluna de granular. Estes protocolos são a certificação de qualidade de cada coluna executada.

5 RESULTADOS

Os dados obtidos através dos controles e garantia de qualidade da nata de pega rápida, apresentaram resultados muito melhores do que os estipulados em projeto. As resistências das natas de pega rápida se mantiveram surpreendentemente dentro dos limites mais rígidos do projeto.

O rígido controle do traço proporcionou grande consistência de resultados também na fluidez e exsudação das natas.

Sondagens posteriores e perfurações de injeções na rocha abaixo das colunas de brita evidenciaram que o alargamento do pé das colunas de brita criou uma camada de solo com propriedades completamente distintas do solo fofo de metadolomito original, viabilizando assim a impermeabilização das inclusões semirrígidas, evitando desta feita o fluxo ascendente através das colunas.



Faixa	Somatório	Valor máximo permitido
Até 0,50 MPa e acima de 2,00 MPa	2,36%	10%
0,51 a 0,75 MPa e 1,51 a 2,00 MPa	10,12%	20%

Figura 7 – Mapa de profundidade de instalação das colunas de brita injetadas e resultado das resistências da nata de pega rápida.

5 CONCLUSÕES

A técnica demonstrou ser não apenas viável, mas também a mais eficaz diante dos desafios impostos pelas condições geotécnicas do local.

As colunas de brita injetadas se destacaram como a solução ótima, superando as limitações do subsolo. A habilidade de controlar a rigidez das colunas, através do controle da resistência da calda, resultou em uma

barreira eficaz contra o fluxo interno de água, prevenindo o transporte de partículas e a consequente formação de vazios no subsolo. Essa abordagem não só promoveu o reforço desejado do solo, mas também possibilitou a construção segura do maciço final da barragem.

A versatilidade da técnica de colunas de brita injetadas se estende para além do contexto de mineração, desmistificando a resistência de sua aplicação em contextos de barramentos de rejeitos por conta de eventual restrição por acréscimo do potencial de liquefação. Sua aplicação pode ser adaptada para uma variedade de projetos de infraestrutura, como rodovias, ferrovias e pisos de galpões logísticos. A capacidade de ajustar a rigidez das colunas torna a técnica particularmente valiosa em condições de solos adversas, como argilas muito moles ou turfas, oferecendo uma solução menos flexível e mais confiável para o reforço de solo nestas condições. A velocidade construtiva e sua relação benefício-custo são diferenciais da tecnologia sem contar a baixa pegada de emissão carbono por incorporar materiais granulares naturais.

Outro aspecto inovador deste projeto é a implementação de uma prova de carga planejada sobre o conjunto de colunas. Este teste será crucial para um entendimento mais aprofundado do comportamento do compósito de solo reforçado. Os resultados esperados da prova de carga têm o potencial de provocar estudos futuros e fomentar o desenvolvimento de novas abordagens das técnicas de reforço de solo.

A técnica de colunas de brita injetadas com nata de pega rápida provou ser uma solução robusta e adaptável para o reforço de fundações em condições geotécnicas complexas. O sucesso deste projeto não apenas atesta a eficácia da técnica, mas também serve como um marco para a engenharia geotécnica, expandindo as possibilidades de aplicação e promovendo inovações na área.

Este estudo reforça a importância de soluções customizadas e bem fundamentadas, que considerem as características únicas de cada local e as demandas específicas de cada projeto. A continuidade da pesquisa e inovação é essencial para avançar na prática da geotecnia e garantir a segurança e a estabilidade das estruturas suportadas por solos reforçados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. S. S.; Marques, M. E. S. (2010). Aterro Sobre Solos Moles Projeto e Desempenho, Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.
- Balaam, N.P.; Booker, J.R. (1981). *Analisis of rigid rafts supported by granular piles. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics*, vol. 5379-403.
- Barksdale, R. D.; Bachus, R.C. (1983). *Design and construction of stone columns*. Report n° FHWA/RD-83/026, National, Technical Information Service, Springfield, Virginia, USA.
- Barron, R.A. (1948). *Consolidation of fine-grained soils by drains wells. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, v.73, n.6, p.811-835.
- European Standard (EN 14731:2005). *Execution of special geotechnical works – Ground treatment by deep vibration*;
- Geotechnical Engineering Handbook (2001) - Volume 1: 6th Edition.
- Geotechnical Engineering Handbook (2008) - Volume 2: 7th Edition.
- Han, J. (2010). Consolidation settlement of stone columns reinforced foundation in soft soils. In: *New Techniques on soft soils*. Almeida, M (Ed.). Oficina de Textos, p. 167-177, São Paulo, Brasil.
- Kirsch, F. (2010), *Ground improvement by deep vibration methods*;
- Kirsch, K. and BELL, A., (2012), *Ground Improvement, Third Edition*;
- Ludemann, S. M. et al. (2020) Pátio sobre Solos Moles Tratados com Colunas de Brita. COBRAMSEG, Campinas, SP, Brasil.
- Priebe, H. (1995) - *The Design of Vibro Replacement*, Ground Engineering
- Souza, Giana L. A. et alii (2016). Projeto e controle de execução de reforço de solos moles utilizando colunas de material granular: experiência com a implantação de um grande empreendimento rodoviário. COBRAMSEG, Belo Horizonte, MG, Brasil.