XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/97

Tratamento de fundação via execução de colunas de brita injetadas em solos coesivos e não coesivos sob condição de artesianismo

Malú Ribas Nakamura
Geóloga, DF+ Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, mnakamura@dfmais.eng.br

Silas Santos Salgado
Geólogo, DF+ Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, ssalgado@dfmais.eng.br

Ledson Alexandre Silveira Sathler
Geólogo, Knight Piésold Consulting, Belo Horizonte, Brasil, lsathler@knightpiesold.com

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

RESUMO: A fundação de uma barragem de rejeitos em Minas Gerais foi caracterizada majoritariamente pela presença de solos coesivos e não coesivos de baixa resistência sob condição de artesianismo, como solo residual de filito brechado mole e solo residual de metadolomito fofo, sobrepondo, de forma geral, o maciço rochoso de metadolomito (Formação Fecho do Funil, Grupo Piracicaba, Supergrupo Minas). Diante deste cenário, como parte do tratamento de fundação, foi proposta a execução de colunas de brita convencionais, solução geotécnica amplamente empregada para aumento de capacidade de suporte e controle de recalques em solos compressíveis. Entretanto, devido a condição local de artesianismo e a verificação do carreamento de materiais não coesivos pelo fluxo ascendente através das colunas de brita, optou-se pela adoção de colunas de brita injetadas (CBIs) com calda de cimento. Para o preenchimento das CBIs, foi necessário que a calda utilizada tivesse um comportamento mecânico específico, com valores de resistência entre 0,75 MPa e 1,50 Mpa, a fim de garantir o preenchimento dos poros das colunas, e não alterar de forma substancial a rigidez em comparação as colunas de brita sem preenchimento. Nos primeiros 4,00 metros iniciais, a partir da base das CBIs, foi utilizado um aditivo de pega rápida, da fabricante MC-Bauchemie, para acelerar a consolidação da calda junto à brita. Foi necessária a utilização de acelerador de pega na composição da calda para se evitar a lavagem durante o processo de construção das colunas, pois a campanha de investigações pré-tratamento indicou que o fluxo de água era mais intenso no contato do maciço rochoso de metadolomito com os solos residuais de metadolomito. O perfil das colunas acima dos primeiros 4,00 m foi construído sem aditivo de pega rápida. Foram executadas 2700 CBIs, com diâmetro mínimo de 0,80 m e espaçamento médio entre eixos de colunas de 1,40 m. Como premissa de projeto, as colunas deveriam ser apoiadas em topo rochoso ou material resistente, e para garantir a capacidade de suporte, foram realizadas injeções de consolidação em solo e rocha na região de apoio das colunas. A análise da efetividade do tratamento de fundação foi realizada por meio de sondagens rotativas, mistas e sônicas, além do método geofísico MASW, para registro da velocidade de cisalhamento (Vs) do meio pré e pós-tratamento. Os resultados foram integrados em ambiente tridimensional no software Leapfrog Works, permitindo a verificação do diâmetro de formação das CBIs e do incremento de Vs do meio tratado.

PALAVRAS-CHAVE: Colunas de brita injetadas, Tratamento de fundação, Barragem de rejeitos.

ABSTRACT: The foundation of a tailings dam in Minas Gerais was predominantly characterized by the presence of low-strength cohesive and non-cohesive soils under artesian conditions, such as soft brecciated phyllite residual soil and loose metadolomite residual soil, generally overlying fractured metadolomite bedrock (Fecho do Funil Formation, Piracicaba Group, Minas Supergroup). Given this scenario, as part of the foundation treatment, the installation of conventional stone columns was proposed, a geotechnical solution widely employed to increase bearing capacity and control settlements in compressible soils. However, due to

the local artesian condition and the verification of migration of non-cohesive materials caused by upward flow through the stone columns, the adoption of Injected Stone Columns (ISCs) with cement grout was selected. For the filling of the ISCs, it was required that the grout exhibit specific mechanical behavior, with strength values between 0.75 MPa and 1.50 MPa, in order to ensure the filling of the column voids without substantially altering the stiffness in comparison to unfilled stone columns. In the first 4.00 meters from the base of the ISCs, a rapid-setting admixture manufactured by MC-Bauchemie was used to accelerate grout setting in contact with the aggregate. The use of a set accelerator in the grout mix was necessary to prevent washout during the column construction process, since the pre-treatment investigation campaign indicated that water flow was more intense at the contact between the metadolomite bedrock and the metadolomite residual soils. The column profile above the initial 4.00 m was built without rapid-setting admixture. A total of 2,700 ISCs were installed, with a minimum diameter of 0.80 m and an average spacing between column axes of 1.40 m. As a design premise, the columns were required to bear on rock head or competent material, and to ensure bearing capacity, consolidation grouting was performed in soil and rock at the column support zone. The evaluation of the effectiveness of the foundation treatment was carried out by means of rotary, mixed, and sonic boreholes, in addition to the MASW geophysical method, to record the shear wave velocity (Vs) of the treated mass before and after treatment. The results were integrated into a three-dimensional environment in Leapfrog Works software, allowing verification of the as-built diameter of the ISCs and the increase in Vs of the treated mass.

KEYWORDS: Injected stone columns, Foundation treatment, Tailings dam.

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta o tratamento de fundação de uma barragem de rejeitos em Minas Gerais, cuja fundação é caracterizada majoritariamente pela presença de solos coesivos e não coesivos de baixa resistência sob condição de artesianismo, como solo residual de filito mole (SR FBM) e solo residual de metadolomito fofo (SR MDF), sobrepondo, de forma geral, o maciço rochoso de metadolomito (Formação Fecho do Funil, Grupo Piracicaba, Supergrupo Minas).

O cenário geológico-geotécnico local marcado por solos residuais silto-argilosos muito moles e arenosos muito fofos presentes sobre o topo rochoso fraturado demandam soluções de tratamento que considerem o fluxo ascendente de água no contato solo-rocha. Colunas de brita convencionais, embora eficazes em solos compressíveis (Ludemann et al., 2020), podem atuar inadvertidamente como drenos verticais sob artesianismo (Kirsch, 2010; Kirsch & Bell, 2012).

Entre as soluções de melhoramento de solos compressíveis aplicáveis a esse cenário, destacam-se as inclusões rígidas e semirrígidas, concebidas para transferir cargas a camadas mais competentes por meio de um compósito solo-coluna de maior rigidez (Combarieu, 1988; ASIRI National Project, 2012).

Desta forma, como parte do tratamento de fundação, adotaram-se CBIs concebidas como inclusões semirrígidas, de modo a promover a redistribuição de tensões e melhoria global da rigidez do maciço (Han, 2010; Kirsch & Bell, 2012), com controle explícito de permeabilidade e rigidez via especificação de calda de baixa resistência (0,75 a 1,50 MPa) e nata de pega rápida nos metros finais de base para reduzir lavagem.

Foram executadas aproximadamente 2.700 CBIs em malha triangular com espaçamento médio de 1,40 m e diâmetro mínimo de 0,80 m. A área de tratamento foi particionada em dois domínios geológico-geotécnicos: um com topo rochoso altamente variável e presença de solo residual de metadolomito profundo intercalado ao maciço (Área 1), e outro com topo rochoso relativamente homogêneo e raso (Área 2) (Figura 1).

A análise da efetividade do tratamento de fundação foi realizada por meio da verificação e comparação dos resultados de sondagens rotativas, mistas e sônicas, SPT, ensaios de permeabilidade e perfilagens gama-gama. Ainda, foram realizados levantamentos via o método geofísico MASW pré, durante e pós-tratamento, integrados em modelo tridimensional para seleção de alvos, QA/QC de dados e decisões de correção.

Os critérios de projeto consideraram a formação das CBIs e seu apoio em material competente, o controle de permeabilidade e rigidez no eixo, e parâmetros mínimos de rigidez do meio tratado avaliados por Vs.

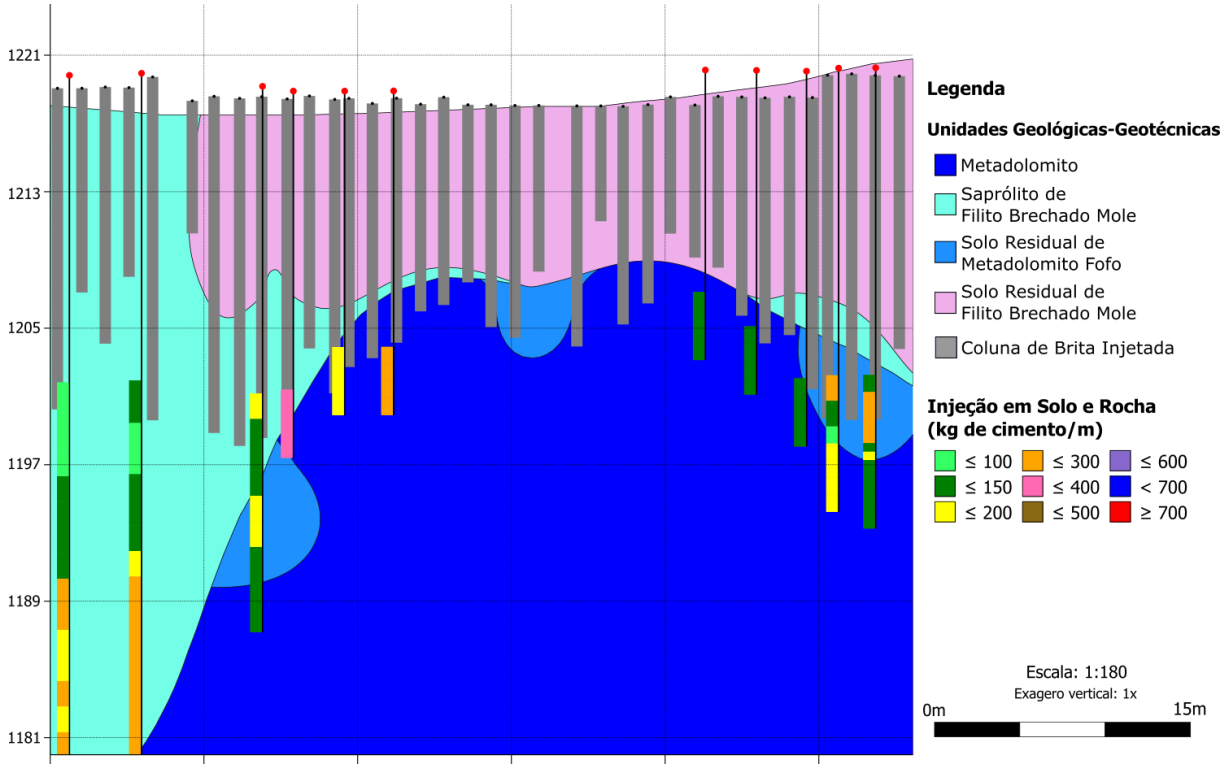


Figura 1. Seção geológico-geotécnica da área de tratamento, com indicação das CBIs executadas em solos residuais silto-argilosos muito moles e arenosos muito fofos presentes sobre o topo rochoso de metadolomito.

2 CARACTERIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO

A fundação é formada por solos residuais sobre topo rochoso fraturado de metadolomito, com heterogeneidade lateral e vertical marcante. Destacam-se o solo residual de filito brechado mole (SR FBM), silto-argiloso, e o solo residual de metadolomito fofo (SR MDF), arenoso, ambos de baixa resistência, além de saprólitos de filito e de metadolomito, mais competentes, e o maciço rochoso de metadolomito com grau de fraturamento variável.

O SR FBM apresenta N_{SPT} pré-tratamento tipicamente baixo (média de 6 e mediana de 4 golpes) e permeabilidade mediana na ordem de 10^{-7} m/s. O SR MDF ocorre de forma rasa, sobre o topo rochoso, e em profundidade intercalado à rocha, com N_{SPT} pré-tratamento de mediana 2 golpes (média 6), trechos com avanço ao peso do martelo e permeabilidade mediana na ordem de 10^{-6} m/s.

Os saprólitos oferecem horizontes de apoio mais competentes (N_{SPT} frequentemente superior a 10 golpes), enquanto o topo rochoso fraturado apresenta variabilidade altimétrica e condutividade dependente do grau de fraturamento. Zonas de fluxo ascendente no contato solo-rocha intensificam o risco de lavagem durante perfuração e injeção, sobretudo no SR MDF (não coesivo), exigindo controle de permeabilidade ao longo do eixo das colunas para evitar comportamento drenante e o uso de calda de baixa resistência com nata de pega rápida nos metros finais das bases das colunas.

Na Área 1, com topo rochoso mais variável, foram executadas CBIs predominantemente nos primeiros 20,00 m e tratamentos complementares em maior profundidade quando necessário; já na Área 2, com topo mais raso e homogêneo, foram executadas CBIs como solução principal, com injeções de consolidação pontuais na base sempre que houve incerteza quanto à capacidade de suporte local.

Como parâmetros de referência pré-tratamento, considerou-se para o SR FBM: N_{SPT} médio/mediano de 6/4 golpes, permeabilidade mediana de $2{,}68\times10^{-7}$ m/s e Vs típico pré de 200-230 m/s; para o SR MDF, N_{SPT} médio/mediano de 6/2 golpes, permeabilidade mediana na ordem de 10^{-6} m/s e Vs típico pré de 180 m/s no trecho raso e 400-500 m/s no trecho profundo.

3 COLUNAS DE BRITA INJETADAS

3.1 Projeto das Colunas de Brita Injetadas

O projeto previu aproximadamente 2.700 CBIs dispostas em malha triangular com espaçamento médio de 1,40 m, diâmetro mínimo de 0,80 m e profundidades típicas até cerca de 20,00 m. Foram executados pré-furos com trado helicoidal devido a pequenas intercalações de materiais resistentes em meio aos solos de baixa resistência. As CBIs foram concebidas para funcionarem como inclusões semirrígidas (Priebe, 1995; Han, 2010; ASIRI National Project, 2012), com alargamento basal recorrente em contato com o SR MDF, comportamento desejável para ampliar a área de transferência de esforços e o apoio das CBIs (Barksdale & Bachus, 1983; Kirsch & Bell, 2012). A calda cimentícia foi especificada com resistência entre 0,75 e 1,50 MPa, suficiente para preencher vazios entre a brita sem impor rigidez excessiva ao compósito solo-coluna. Para mitigar lavagem sob fluxo ascendente no contato solo-rocha, restringiu-se o uso de nata de pega rápida aos aproximadamente 4,00 m finais de base; acima desse trecho, empregou-se calda sem acelerador.

Os critérios de desempenho das CBIs incluíram a verificação de formação íntegra e apoio em material competente (topo rochoso, saprólito ou solo previamente tratado), a manutenção do caráter semirrígido mediante controle de permeabilidade no eixo (evitando configuração drenante) e a obtenção de parâmetros mínimos de rigidez do meio tratado, aferidos por Vs. Destaca-se que foi realizado o controle tecnológico por meio de uma ampla campanha de ensaios uniaxiais nas caldas de cimento, os quais garantiram a faixa de resistência prevista em projeto, assegurando a eficácia e a conformidade das CBIs com os requisitos técnicos estabelecidos.

3.2 Execução das Colunas de Brita Injetadas

A execução iniciou-se por pré-furo com hélice contínua até a profundidade limite geotécnica ou do equipamento (aproximadamente 20,00 m), retirando-se o mínimo de material para facilitar a penetração do vibrocompactador sem criar um duto contínuo. Em seguida, procedeu-se à vibrossubstituição com alimentação pela ponta, introduzindo a brita 2 e a calda por via dedicada na extremidade inferior do vibrocompactador (Brumano et al., 2024).

A coluna foi construída em ciclos de subida e descida, com compactação radial do agregado contra o solo circundante, controle de verticalidade e monitoramento contínuo de esforço através da amperagem/corrente elétrica e tempo, até a cota da plataforma de trabalho (Brumano et al., 2024).

O controle tecnológico incluiu registro automático de profundidade *versus* tempo, esforço de compactação e consumo de calda para cada coluna, estimativa de diâmetro formado por consumo, verificação de alargamento basal e compatibilização com o modelo tridimensional de *As Built* do tratamento de fundação para garantir a rastreabilidade e permitir ações corretivas imediatas.

4 METODOLOGIA DE VERIFICAÇÃO DO TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO

A verificação do tratamento de fundação combinou a análise dos resultados de sondagens rotativas, mistas e sônicas no eixo e entre colunas (para checar formação, estimar diâmetros e confirmar apoio), ensaios percussivos para quantificar incrementos de resistência/compacidade nos solos adjacentes e ao longo do fuste, ensaios de permeabilidade (infiltração em solos/CBIs e perda d'água sob pressão em rocha) para avaliar a condutividade hidráulica do compósito e do topo rochoso, perfilagens gama-gama para estimar densidades representativas e levantamentos sísmicos MASW (Park et al., 1999) pré, durante e pós-tratamento para aferição expedita de rigidez.

Todos os resultados foram integrados em um modelo tridimensional unificado, que permitiu selecionar alvos de verificação, checar consistência posicional e altimétrica, identificar anomalias e orientar colunas de brita injetadas e/ou injeções de consolidação complementares quando necessário. Os critérios de aceitação consideraram a comprovação do apoio das CBIs em material resistente, a manutenção de comportamento semirrígido mediante controle de permeabilidade no eixo e a elevação dos parâmetros de Vs nos solos tratados para níveis iguais ou superiores ao alvo de projeto.

5 RESULTADOS

As sondagens confirmaram a formação das CBIs com diâmetro médio formado da ordem de 1,10 m e a ocorrência frequente de alargamento basal em contato com o SR MDF (Figura 2), coerente com a menor resistência local e a maior substituição granular.

Caçamba	Profundidade Inicial	Profundidade Final	Diâmetro Estimado
CM1	20.20	19.96	2.28
CM2	19.96	19.06	1.19
CM3	19.06	18.16	1.19
CM4	18.16	16.88	1.00
CM5	16.88	16.00	1.20
CM6	16.00	15.18	1.25
CM7	15.18	14.12	1.10
CM8	14.12	12.62	0.92
CM9	12.62	10.74	0.82
CM10	10.74	9.34	0.95
CM11	9.34	8.05	1.00
CM12	8.05	6.98	1.09
CM13	6.98	5.66	0.98
CM14	5.66	4.31	0.97
CM15	4.31	2.22	0.78
CM16	2.22	0.00	0.76
Obs:			

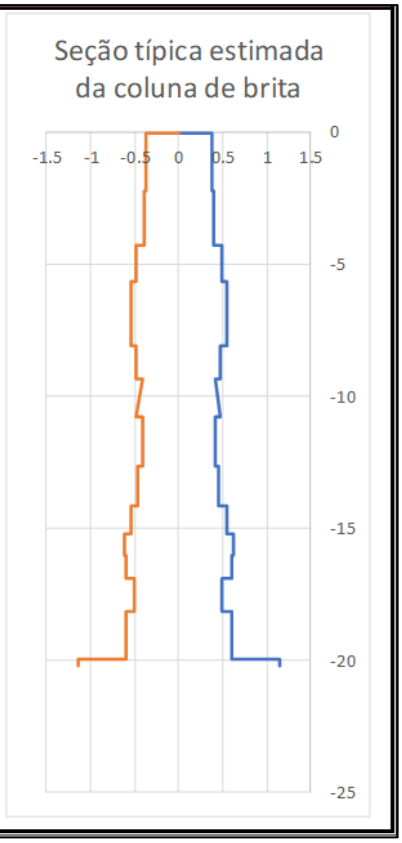


Figura 3. Gráfico com o diâmetro aproximado para uma coluna de brita, em que é possível observar o alargamento na base da coluna.

O apoio em material competente foi verificado em diversos pontos (topo rochoso de metadolomito – Figura 3, saprólito ou solo tratado) e eventuais indicativos de materiais potencialmente de baixa resistência foram tratadas com injeções de consolidação adicionais na base.

Em termos hidráulicos, os ensaios de infiltração realizados no eixo das CBIs indicaram mediana de permeabilidade na ordem de 10^{-6} m/s, com trechos típicos entre 10^{-5} e 10^{-7} m/s; valores pontuais mais elevados foram associados a menor impregnação local de calda, especialmente em segmentos com maior presença de solo aglutinado (Figura 4).

Em termos de rigidez e resistência, os SPTs registraram incremento no SR MDF (média/mediana de 6/2 para 11/5 golpes) e no SR FBM (6/4 para 8/5 golpes). Ao longo do eixo das CBIs, a mediana foi de 36 golpes, com dispersão explicada por trechos com solo intercalado ou forro de brita.

Os levantamentos MASW pós-tratamento (Figura 5) mostraram que os solos tratados, considerados como meio composto CBI+solo, atingiram mediana de Vs ao redor de 330 m/s, com 98% dos pontos iguais ou superiores a 210 m/s, e que a rocha apresentou mediana próxima de 910 m/s, evidenciando uma homogeneização devido às injeções de consolidação. Em várias seções, notou-se zona com Vs elevados, da ordem de 1000 m/s, na base das CBIs, associada a maior volume de calda e/ou à transição para materiais mais competentes.



Figura 3. Coluna de brita apoiada no topo rochoso de metadolomito que se inicia aproximadamente à profundidade de 15,90 m.



Figura 4. Testemunho de sondagem registando significativa presença de calda associada a brita.

As perfilagens gama-gama indicaram para as CBIs mediana de densidade ao redor de 2,00 g/cm³, compatível com peso específico adotado próximo de 20 kN/m³, para o metadolomito valores típicos próximos

de 2,60 g/cm³ (γ≈27 kN/m³) e, para o SR MDF profundo, densidades representativas na faixa de 2,00 a 2,20 g/cm³ (Figura 4), coerentes com o comportamento observado em campo e demais linhas de evidência.

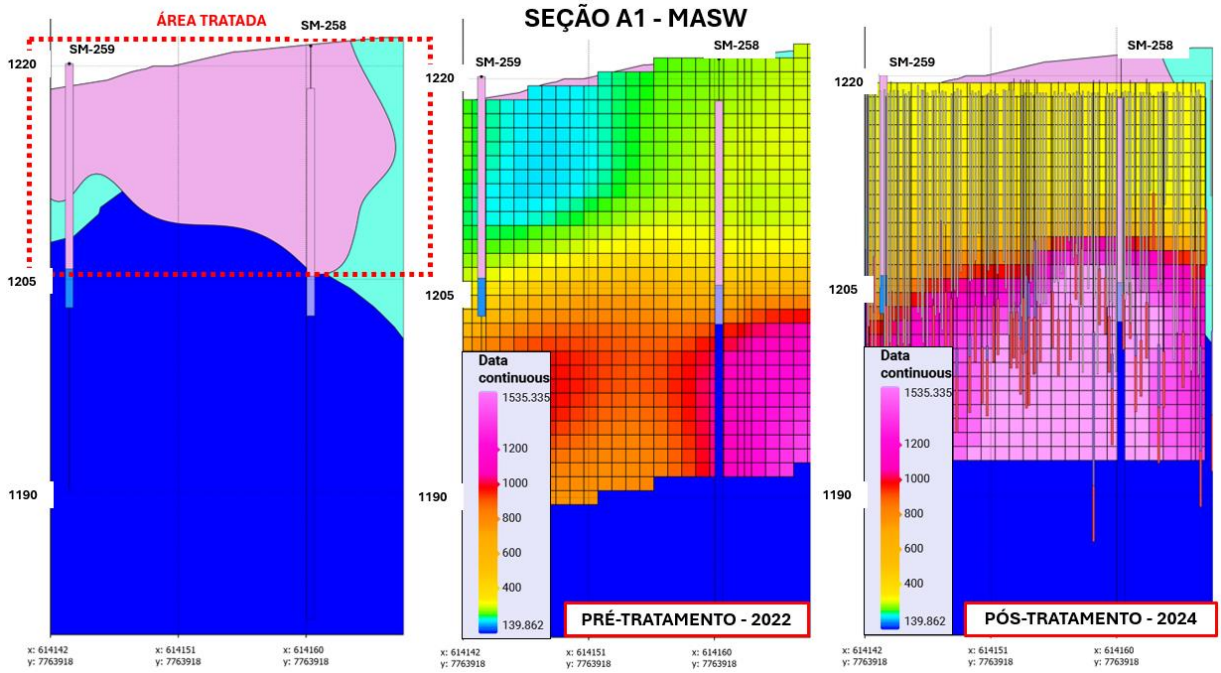


Figura 5. Seção MASW apresentando da esquerda para direita – dados geológico-geotécnicos; dados Vs do voxel 3D pré-tratamento de fundação (2022) e dados Vs do voxel 3D pós-tratamento de fundação (2024).

6 DISCUSSÕES

As evidências de formação e apoio das CBIs verificados por sondagens, a rigidez local ao longo do fuste verificada por sondagens percussivas, a rigidez global verificada via o método MASW (Park et al., 1999), a condutividade hidráulica no eixo verificada por ensaios de infiltração e os dados de densidade gama-gama correlacionados ao aumento de compacidade/resistência do meio, sustentam o comportamento de inclusão semirrígida e não drenante conforme previsto em projeto.

A análise integrada dos dados permite uma maior confiabilidade na performance do tratamento, já que, por exemplo, ao comparar os dados de regiões onde se observou o incremento nos valores de Vs, verificou-se que essas mesmas regiões são correspondentes com áreas injetadas em solo e/ou rocha ou onde as sondagens verificaram a perfeita formação da coluna de brita.

A mediana de Vs de 330 m/s obtida para o meio composto CBI+solo é compatível com a faixa esperada para solos tratados por inclusões semirrígidas, conforme os mecanismos de transferência de carga descritos por Combarieu (1988), Han (2010) e ASIRI National Project (2012).

Do ponto de vista executivo, o uso de nata de pega rápida restrita à base e a manutenção do pré-furo foram decisivos para evitar lavagem, garantir penetração controlada e assegurar o apoio em material competente.

7 CONCLUSÕES

A execução de CBIs direcionadas ao incremento de resistência de solos moles e fofos sob condição de artesianismo, em conjunto ao seu controle da permeabilidade, demonstrou-se uma solução técnica viável e efetiva no presente projeto, superando a limitação das colunas convencionais, que podem atuar como drenos verticais nessa condição (Kirsch, 2010; Kirsch &; Bell, 2012).

As CBIs, conforme o previsto, apresentaram diâmetro médio ao redor de 1,10 m e alargamento basal recorrente em contato com o SR MDF. A resistência a compressão da calda na faixa de 0,75 a 1,50 MPa, aliada à nata de pega rápida restrita aos aproximadamente 4,00 m finais de base e ao pré-furo, mostrou-se eficaz para mitigar lavagem, controlar a permeabilidade no eixo e assegurar o apoio em material competente, resultado

coerente com a metodologia executiva de vibrossubstituição com alimentação pela ponta adotada (Brumano et al., 2024). A permeabilidade no eixo das CBIs, mediana na ordem de 10^{-6} m/s, e os valores de N_{SPT} elevados ao longo do fuste confirmam o caráter de inclusão semirrígida, não drenante.

Em termos de rigidez, a mediana de Vs nos solos tratados, considerada para o meio composto CBI+solo, situou-se ao redor de 330 m/s, com 98% dos pontos iguais ou superiores a 210 m/s; no maciço rochoso, a mediana pós-tratamento de aproximadamente 910 m/s indica homogeneização por injeções. Os resultados dos ensaios à percussão evidenciaram incremento de resistência no SR MDF (média/mediana de 6/2 para 11/5 golpes) e no SR FBM (6/4 para 8/5 golpes), e as densidades obtidas por gama-gama suportam os pesos específicos adotados para análises.

A complementaridade entre N_{SPT} e Vs mostrou-se muito eficaz: os incrementos de resistência observados nos ensaios à percussão foram consistentes com os incrementos de Vs verificados através do MASW, gerando evidência que reforça a confiabilidade dos critérios de aceitação adotados. A combinação de sondagens mistas com levantamentos MASW pré e pós-tratamento demonstrou-se uma abordagem robusta e especialmente adequada a esse contexto geológico-geotécnico, permitindo caracterizar o perfil individual das colunas e a rigidez global do meio tratado de forma integrada e expedita.

Os resultados são consistentes com o arcabouço teórico de inclusões semirrígidas (ASIRI National Project, 2012; Combarieu, 1988) e com estudos de tensão-deformação desenvolvidos no mesmo contexto geológico (Silva et al., 2024), reforçando a aplicabilidade das CBIs em fundações de barragens de rejeitos sob condições de artesianismo.

Para projetos futuros em condições análogas, recomenda-se a adoção da abordagem de verificação multimétodo (sondagens mistas, ensaios de permeabilidade e MASW pré e pós-tratamento), integrados em modelo tridimensional, como prática de QA/QC. A integração de dados em modelo 3D permitiu direcionar verificações, corrigir inconsistências pontuais e aplicar ações corretivas localizadas, consolidando o atendimento aos critérios de projeto e a aplicabilidade das CBIs sob condições de artesianismo, sem indução de comportamento drenante e com apoio competente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASIRI National Project (2012). *Recommendations for the Design, Construction and Control of Rigid Inclusion Ground Improvements*. IREX/Presses des Ponts, Paris.

Barksdale, R.D.; Bachus, R.C. (1983). *Design and construction of stone columns*. FHWA/RD-83/026.

Brumano, F. et al. (2024). *Metodologia Executiva de Colunas de Brita Injetadas com Nata de Pega Rápida para Reforço de Fundações de Barragem de Rejeitos*. COBRAMSEG.

Combarieu, O. (1988). *Amélioration des sols par inclusions rigides verticales – Application à l'édification des remblais sur sols médiocres*. Revue Française de Géotechnique, n. 44, p. 57-79.

Han, J. (2010). *Consolidation settlement of stone column reinforced foundation in soft soils. In: New Techniques on Soft Soils*. Oficina de Textos. Kirsch, F. (2010). Ground improvement by deep vibration methods.

Kirsch, K.; Bell, A. (2012). *Ground Improvement*, Third Edition.

Ludemann, S.M. et al. (2020). *Pátio sobre solos moles tratados com colunas de brita*. COBRAMSEG.

Park, C.B.; Miller, R.D.; Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. Geophysics, 64(3), 800-808.

Priebe, H. (1995). *The Design of Vibro Replacement*. Ground Engineering.

Silva, F.M.; Lopes, M.; Silva, N.B. (2024). *Análises de Tensão-Deformação do Tratamento de Fundações de uma Barragem de Rejeito com Colunas de Brita Injetadas*. COBRAMSEG.