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/COBRAMSEG2026.4/50

Contenção em Jet Grouting para Escavação de Virador de Vagões

Akira Koshima
Gerente Técnico, Novatecna S.A, São Paulo, Brasil, akira@novatecna.com.br

Alfredo D. de Moraes Filho
Gerente Obras, Novatecna S.A, São Paulo, Brasil, alfredomoraes@novatecna.com.br

Alberto Ortigão, PhD, FICE, CEng (UK), PE (US)
Consultor Geotécnico, Rio de Janeiro, Brasil, ortigão@terratekinc.com

Miriano R. Pieroni
Diretor Presidente, Novatecna S.A, São Paulo, Brasil, pieroni@novatecna.com.br

Luis Augusto S. Moreira
Geólogo, Novatecna S.A, São Paulo, Brasil, luis.augusto@novatecna.com.br

RESUMO: A implantação de um virador de vagões no Porto de Itaguaí (RJ), em ambiente com sedimentos quaternários saturados com topo rochoso gnáissico altamente irregular, exigiu escavação com até 20 m de profundidade em maciço misto solo–rocha, sob nível d'água raso. A profundidade do topo rochoso variou entre 2 e mais de 20 m ao longo de cerca de 200 m de extensão, condicionando soluções distintas de contenção. Para viabilizar a escavação vertical em solo e o posterior desmonte com explosivos na rocha sã, adotou-se contenção provisória em colunas secantes de Jet Grouting (JG, diâmetro 1,20 m), engastadas na rocha e, nos trechos críticos, pinadas com barras de aço. O dimensionamento foi realizado por modelagem numérica em elementos finitos (Plaxis 2D) e verificação por equilíbrio limite, adotando fatores de segurança mínimos de 1,30 em condição estática e 1,10 sob aceleração horizontal equivalente a 0,1g. Os deslocamentos horizontais previstos variaram entre 8 mm e 68 mm. A instrumentação por inclinômetros indicou deslocamentos máximos da ordem de ±20 mm, inferiores aos limites de segurança estabelecidos. O desempenho observado confirmou a estabilidade do bloco de JG e da interface solo–rocha durante as escavações profundas e as detonações controladas.

PALAVRAS-CHAVE: Jet Grouting, Escavação Profunda, Interface Solo–Rocha, Modelagem Numérica, Instrumentação Geotécnica

ABSTRACT: The construction of a wagon tippler at the Port of Itaguaí (RJ), located in a recent coastal–estuarine environment characterised by saturated Quaternary sediments and a highly irregular gneissic rockhead, required excavation depths of up to 20 m in a mixed soil–rock mass under shallow groundwater conditions. The rockhead varied from 2 m to more than 20 m along approximately 200 m of alignment, leading to distinct retaining solutions. To enable vertical excavation in soil followed by controlled blasting in sound rock, a temporary retaining system composed of secant Jet Grouting columns (1.20 m diameter) was adopted, socketed into the rock and, in critical sections, pinned with steel bars. The design was carried out using finite element numerical modelling (Plaxis 2D) and verified by limit equilibrium analyses, adopting minimum safety factors of 1.30 under static conditions and 1.10 under a horizontal acceleration equivalent to 0.1g. Predicted horizontal displacements ranged from 8 mm to 68 mm. Inclinometer monitoring indicated maximum displacements of approximately ±20 mm, below the established safety limits. The observed performance confirmed the stability of the Jet Grouting block and the soil–rock interface during deep excavations and controlled blasting operations.

KEYWORDS: Jet Grouting, Deep Excavation, Soil–Rock Interface, Numerical Modelling, Geotechnical Instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

A implantação de estruturas portuárias em ambientes costeiro-estuarinos impõe desafios geotécnicos relevantes, decorrentes da presença de sedimentos quaternários saturados, elevada variabilidade estratigráfica e nível d'água raso. No Porto de Itaguaí (RJ), na Baía de Sepetiba, essas condições são associadas à proximidade dos maciços cristalinos da Serra do Mar, compostos predominantemente por gnaisses e granitoides, cujo topo rochoso apresenta geometria altamente irregular.

O perfil típico da área é constituído por aterros superficiais sobre depósitos flúvio-marinhos heterogêneos — areias médias a grossas, siltes e argilas marinhas — que recobrem solos residuais de pequena espessura e, em profundidade variável, o embasamento cristalino. A transição solo–rocha ocorre de forma abrupta, com o topo rochoso variando entre aproximadamente 2 m e mais de 20 m ao longo de cerca de 200 m de extensão. Essa variabilidade condiciona o comportamento das escavações e exige soluções que acomodem mudanças significativas de rigidez e resistência ao longo do traçado.

Nesse contexto a projetista desenvolveu a implantação de um virador de vagões, demandando escavação com até 20 m de profundidade em maciço misto solo–rocha, parte em solo saturado e parte em rocha sã com uso de explosivos. A proximidade de edificações operacionais, infraestrutura ferroviária ativa e interferências enterradas (Figura 1) impôs restrições quanto as deformações admissíveis e estabilidade global.

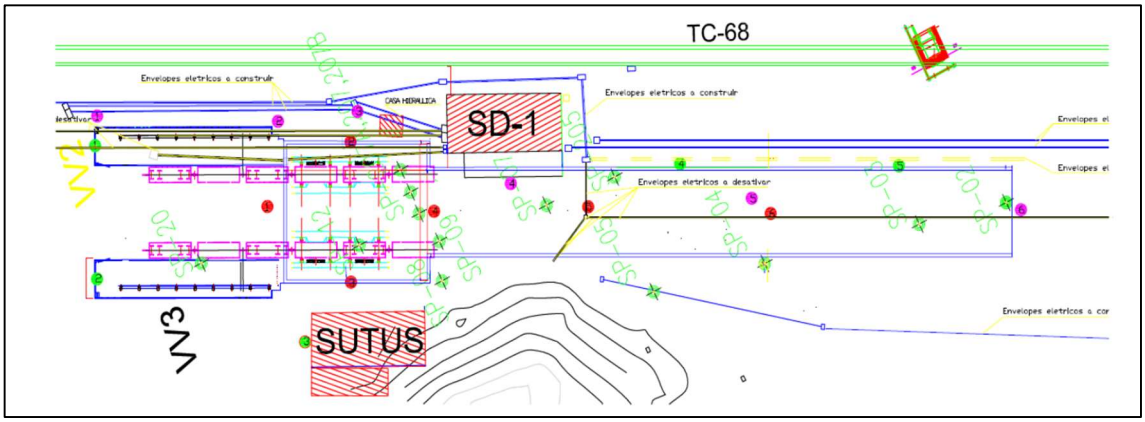


Figura 1. Planta do Virador, Interferencias e Sondagens

Diante dessas condicionantes, adotou-se solução de contenção provisória em colunas secantes de Jet Grouting (JG) engastadas na rocha, complementadas por pinagem em trechos críticos. O dimensionamento foi conduzido por modelagem numérica em elementos finitos e verificação por métodos de equilíbrio limite, sendo o desempenho avaliado por instrumentação geotécnica.

O presente trabalho apresenta a caracterização geotécnica do sítio, os critérios de projeto adotados, os resultados das análises e a comparação entre deslocamentos previstos e medidos, discutindo o comportamento da interface solo–rocha durante escavações profundas com detonações controladas.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

O empreendimento está localizado no Porto de Itaguaí (RJ), inserido na Baía de Sepetiba, em ambiente costeiro-estuarino de sedimentação recente. Regionalmente, a área é limitada por maciços cristalinos da Serra do Mar, compostos predominantemente por gnaisses e granitoides, que constituem o embasamento rochoso da região.

2.1 Contexto Geológico e Estratigráfico

O perfil geotécnico foi definido com base em sondagens à percussão e mistas, ensaios de perda d'água, levantamentos geofísicos e ensaios de piezocone (CPTU) – ver Figura 2. De modo geral, a estratigrafia típica compreende:

- Aterro superficial de regularização, heterogêneo e com controle de compactação variável;
- Depósitos quaternários flúvio-marinhos saturados, compostos predominantemente por areias médias a grossas, intercaladas com siltes e argilas marinhas de consistência variável;
- Solo residual de pequena espessura;
- Embasamento cristalino gnáissico, de elevada resistência.

O nível d'água foi identificado próximo à superfície, em torno de 1 m de profundidade, caracterizando condição permanentemente saturada nos depósitos superficiais.

A transição entre solo e rocha ocorre de forma abrupta, com reduzida espessura de solo residual, resultando em mudança significativa de rigidez e resistência ao longo do perfil.

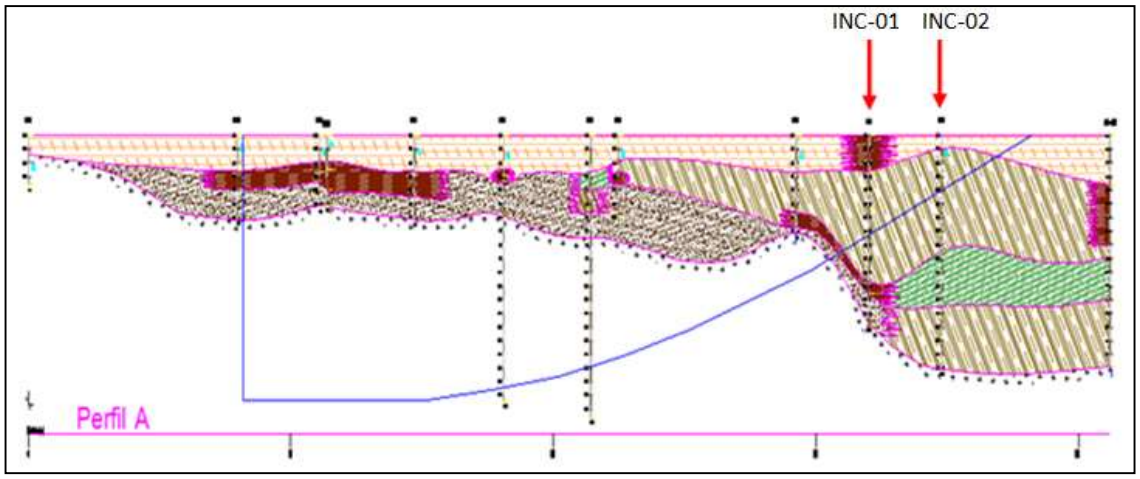


Figura 2. Perfil Geotécnico Longitudinal (Perfil "A" Sul, com a Indicação de Inclinômetros).

2.2 Geometria do Topo Rochoso

O topo rochoso apresenta geometria altamente irregular, com variação entre 2 m a mais de 20 m de profundidade ao longo de cerca de 200 m de extensão da obra. Essa configuração é atribuída a processos erosivos associados à dinâmica fluvial e marinha pretérita, que originaram reentrâncias e paleocanais no embasamento.

Essa variabilidade espacial condicionou a ocorrência de trechos com escavação predominantemente em solo, enquanto em outros a rocha aflorava próxima ao nível final da escavação. Consequentemente, as soluções de contenção precisaram acomodar mudanças significativas de comportamento do maciço ao longo do traçado.

2.3 Caracterização Geotécnica para o Projeto

Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises foram definidos a partir da interpretação dos ensaios CPTU e da correlação com dados de sondagens. Os depósitos superficiais apresentaram comportamento predominantemente granular arenoso a silto-argiloso e material antrópico, com variabilidade lateral relevante.

Nas análises numéricas, os solos foram modelados por meio de modelo constitutivo dependente do nível de deformação, compatível com a rigidez não linear observada em solos granulares e finos saturados. O embasamento rochoso foi considerado como material de elevada rigidez, servindo como base de engaste para as colunas de JG.

2.4 Implicações para a Escavação

A combinação de nível d'água raso, heterogeneidade dos sedimentos e geometria irregular do topo rochoso impôs condições críticas para escavações profundas, especialmente nos trechos onde o contato solo–

rocha ocorria próximo ao fundo da escavação. A mudança abrupta de rigidez entre solo tratado e rocha sã demandou atenção específica quanto à estabilidade global, ao controle de deformações horizontais e ao comportamento da interface.

Essas características foram determinantes na definição da solução de contenção adotada, descrita nos itens seguintes.

3 CONCEITO, CRITÉRIOS DE PROJETO E MODELAGEM NUMÉRICA

3.1 Conceito Estrutural da Contenção

A contenção provisória foi concebida por meio de colunas secantes de JG, com diâmetro nominal de 1,20 m (Figura 3.), executadas até o engaste no embasamento rochoso.

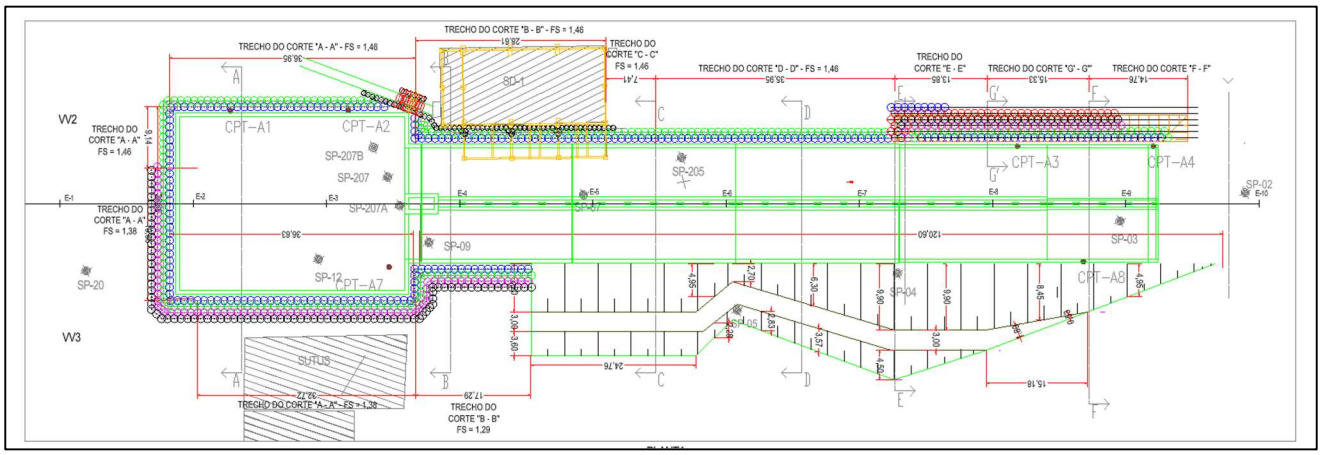


Figura 3. Planta Geral com Locação das Colunas JG.

Nos trechos com maior espessura de solo (até aproximadamente 8 m), o projeto adotou quatro fileiras de colunas (Figura 4.), espaçadas 1 m entre eixos na mesma fileira e 0,9 m entre fileiras, em arranjo alternado quincôncio, formando bloco com comportamento equivalente a muro de gravidade engastado na rocha.

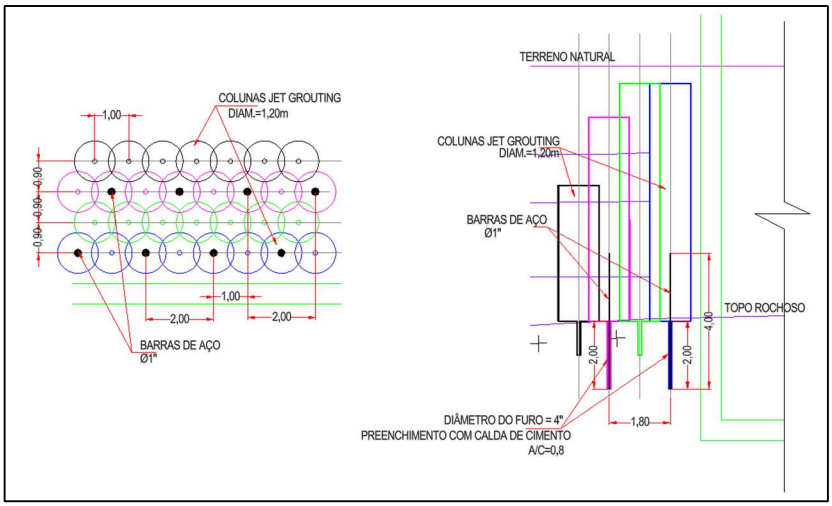


Figura 4. Arranjo das Colunas JG em Trecho com Maior Espessura de Solo (Planta e Seção).

Nos segmentos com menor altura de solo, o projeto empregou duas fileiras de colunas, mantendo-se o conceito estrutural.

Em regiões submetidas a maiores solicitações, especialmente próximas à interface solo–rocha e às áreas

de detonação, o projeto empregou pinagem das colunas por meio de barras de aço engastadas na rocha, mínimo de 2m, e posteriormente injetadas com calda de cimento.

3.2 Critérios de Projeto

O dimensionamento geotécnico empregou análises numéricas em elementos finitos (MEF) e verificação por métodos de equilíbrio limite (MEL). A Tabela 1 sumariza os critérios de projeto

As análises empregaram uma aceleração horizontal de 0.1g para representar o efeito das escavações a fogo em rocha.

Tabela 1. Critérios de Projeto Adotados.

Critério	Valor Adotado
Fator de Segurança (estático)	FS ≥ 1,30
Fator de Segurança pseudo-estático (a = 0,1g)	FS ≥ 1,10
Deformação horizontal máxima	1% da altura escavada
Tensão de tração admissível no JG	≤ 10 kPa

3.3 Modelagem Numérica

As análises tensão-deformação realizadas com Plaxis 2D, empregando o modelo constitutivo Hardening Soil Small (HSM Small) para os solos. Com parâmetros extraídos de ensaios CPTU, metodologia essas que têm se mostrado assertiva e confiável em análises semelhantes (Ortigão et al, 2025). As simulações contemplaram:

- Estratigrafias representativas das seções críticas;
- Fases construtivas sequenciais de escavação;
- Aplicação de carregamentos superficiais conforme restrições operacionais;
- Introdução de aceleração horizontal equivalente a 0,1g nas análises pelo MEL

As colunas de JG foram modeladas com propriedades conforme Tabela 2, abaixo.

Tabela 2. Parâmetros Adotados para as Colunas de JG

Parâmetro	Valor
Coesão (c)	400 kPa
Ângulo de atrito (φ)	35°
Módulo de Young (E)	800 MPa
Módulo de corte (G)	300 MPa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,3

As análises Plaxis 2D iniciavam com um muro com grandes dimensões que eram reduzidas pari passu no modelo até que a deformação horizontal máxima atingisse cerca de 1% da altura do muro.

3.4 Resultados das Análises

Os fatores de segurança obtidos variaram entre 1,30 e 1,77 nas condições estáticas avaliadas, mantendo-se superiores a 1,10 quando considerada aceleração horizontal equivalente.

Os deslocamentos horizontais máximos previstos variaram conforme profundidade e seção analisada, atingindo valores máximos da ordem de 66 mm nos trechos mais solicitados. As tensões de tração no JG permaneceram inferiores ao limite admissível de 10 kPa.

Os resultados forneceram base técnica para a execução da solução adotada, sendo posteriormente confrontados com os dados de instrumentação de campo.

4 EXECUÇÃO DA SOLUÇÃO E MONITORAMENTO

4.1 Execução da Contenção

As colunas de JG tiveram diâmetro nominal de 1,20 m, dispostas conforme geometria definida em projeto. A perfuração foi realizada até o engaste no embasamento rochoso, definido pelo avanço impenetrável do tricone ou pela confirmação geológica do contato solo–rocha (Koshima, 2016).

Nos trechos com quatro fileiras, as colunas foram executadas em arranjo alternado quincôncio, garantindo formação de bloco monolítico contínuo. Em regiões críticas, as colunas de JG eram pinadas por meio de furos executados por roto-percussão com martelo de fundo, com engaste mínimo na rocha de 2m e posterior instalação de barras de aço (ø 25,4 mm, CA 50) injetadas com calda de cimento. Após a execução do tratamento em solo, a escavação prosseguiu de forma vertical nas colunas de JG até a interface com a rocha. A partir desse nível, a escavação foi realizada por desmonte controlado com explosivos, empregando técnica de pré-splitting para acabamento da parede rochosa e redução de vibrações (Figura 5.).



Figura 5. Detalhe da escavação vertical (8 m) expondo a junta entre o JG e a rocha.

O bloco de JG permaneceu exposto durante as fases subsequentes de escavação em rocha, sem aplicação de revestimento provisório adicional (Figura 6).

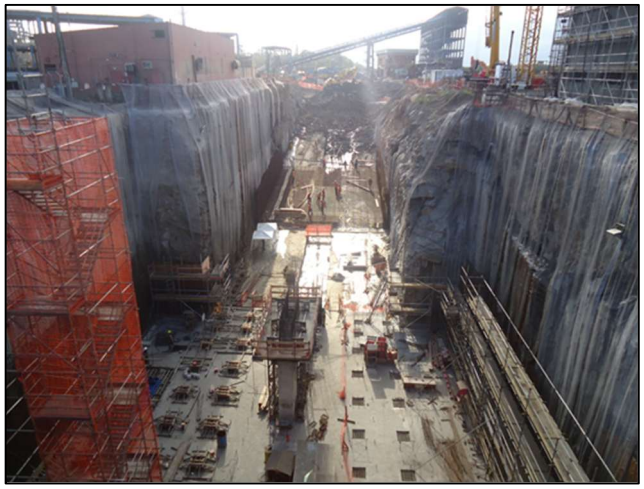


Figura 6. Vista da obra com a escavação concluída.

4.2 Instrumentação e Monitoramento

O projeto de instrumentação incluiu dois inclinômetros em trechos mais críticos e medição de vibrações através de um registrador com acelerômetros. Com base na deformação máxima nas análises numéricas de 1% da altura, os projetistas definiram os seguintes limites:

- 80 mm para escavação de 8 m (INC-01);
- 40 mm para escavação de 4 m (INC-02).

Os resultados medidos indicaram (Figura 7):

- INC-01: deslocamentos da ordem de ±3,8 mm, dentro do cone de acurácia do equipamento e significativamente inferiores ao limite de segurança (80 mm) e ao valor previsto em análise numérica (68 mm);
- INC-02: deslocamentos máximos da ordem de ±20 mm no topo, inferiores ao limite de segurança (40 mm) e ao deslocamento máximo previsto em projeto (≈35 mm)

O projeto adotou os critérios da norma DIN 4150 para controle de vibrações. Na maioria das detonações, os valores de velocidade medidos estiveram aceitáveis. Entretanto ocorreu somente um caso de erro grave nas detonações que que a velocidade medida chegou a 80 mm/s. Isso acendeu um alarme, mas a inspeção de campo realizada em seguida detectou deslocamento de um bloco de rocha. Este foi estabilizado com ancoragens. A partir deste evento, a Fiscalização tomou maiores cuidados nas detonações e a obra prosseguiu sem problemas.

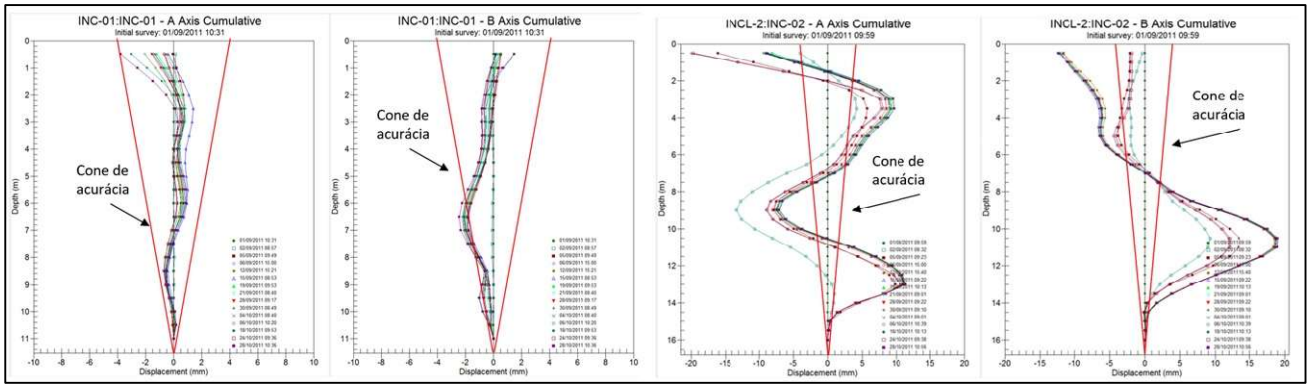


Figura 7. Deslocamentos vistos em corte apresentando cone de acurácia para INC-01 e INC-02.

Nas análises numéricas, os deslocamentos horizontais previstos atingiram valores máximos da ordem de 66 mm nos trechos mais solicitados. As medições de campo apresentaram valores substancialmente inferiores aos limites estabelecidos e compatíveis com o desempenho previsto em projeto.

As detonações não provocaram deterioração na interface solo tratado–rocha durante as detonações controladas, nem manifestações de instabilidade no muro de JG.

A comparação entre resultados calculados e medidos indicou comportamento estrutural satisfatório da contenção, validando as premissas adotadas na modelagem e os critérios de projeto estabelecidos.

4 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, na execução da obra e nos resultados de instrumentação, pode-se concluir:

- A escavação do poço do virador, com profundidade de até 20 m em maciço misto solo–rocha e

nível d'água a aproximadamente 1 m da superfície, foi viabilizada por meio de bloco de colunas secantes de JG engastadas na rocha, garantindo estabilidade durante todas as fases executivas.

- Nos trechos com maior espessura de solo (até 8 m), a contenção foi composta por quatro fileiras de colunas de 1,20 m de diâmetro, espaçadas 1 m entre eixos, dispostas em arranjo alternado quincôncio. Em segmentos com menor altura de solo (até cerca de 2 m), o projeto adotou duas fileiras, mantendo-se o conceito estrutural.
- O engaste das colunas no embasamento rochoso foi definido a partir da confirmação do contato solo–rocha durante a perfuração. Nos trechos críticos, a pinagem foi executada em colunas alternadas, distribuídas de modo a formar malha estrutural interligada, aumentando a capacidade de transferência de esforços entre o bloco tratado e a rocha.
- O bloco de JG permaneceu exposto durante a escavação em rocha, executada com desmonte controlado por explosivos até a profundidade final, sem evidências de instabilidade ou degradação da interface solo tratado-rocha.
- As análises indicaram fatores de segurança entre aproximadamente 1,30 e 1,77 em condição estática, mantendo-se superiores a 1,10 quando considerada aceleração horizontal equivalente a 0,1g.
- Os deslocamentos horizontais previstos atingiram valores máximos da ordem de 66 mm, respeitando o critério de deformação de 1% da altura escavada.
- A instrumentação por inclinômetros, instalada em taludes tratados exclusivamente em solo com alturas de 8 m e 4 m, indicou deslocamentos máximos significativamente inferiores aos limites de segurança estabelecidos e compatíveis com as previsões numéricas.
- Não foram observados aumentos de infiltração ou carreamento de materiais na interface solo–rocha durante as detonações controladas, indicando comportamento satisfatório da junta entre o bloco tratado e o embasamento.
- As edificações lindeiras não apresentaram manifestações patológicas associadas às detonações, evidenciando desempenho adequado da contenção tratada. Em contraste, taludes em solo não tratado apresentaram instabilizações induzidas por vibração, reforçando a eficácia da solução em JG

Os resultados obtidos demonstram que a utilização de colunas secantes de JG engastadas na rocha, complementadas por pinagem em trechos críticos, constitui solução tecnicamente adequada para escavações profundas em maciços heterogêneos com topo rochoso irregular e presença de carregamentos dinâmicos associados a detonações controladas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos profissionais da empresa Terratek pelo suporte técnico prestado nas análises e no desenvolvimento das soluções adotadas, em especial ao Eng. Halley Ribeiro, cuja contribuição foi relevante nas etapas de estudo e validação do projeto.

Registram também agradecimento à empresa Novatecna S.A. e à sua equipe técnica, pela participação na execução e no acompanhamento das atividades relacionadas ao tratamento em JG.

Por fim, reconhecem a contribuição dos profissionais que integraram a equipe da empresa Paranasa, responsável pela execução da escavação e das obras civis associadas.

6 REFERÊNCIAS

DIN 4150 *Erschütterungen im Bauwesen*

Koshima, A. Jet Grouting. In: Hachich, W. et al. (Ed.). Fundações: Teoria e Prática. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. Cap. 17.2.

Ortigão A., Ribeiro H. L., Damasco-Penna A., Sieira A. C. C. (2025) FE analysis of a deep excavation in Santos's clay, European Journal of Engineering and Technology Research, vol 10, Issue 1, February 2025 pp 33-39, ISSN 2736-576X - DOI Link *https://doi.org/10.24018/ejeng.2025.10.1.3205*