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/COBRAMSEG2026.1/57

Prova de carga estática *in situ* de um grupo de colunas de brita injetadas na solução de tratamento de fundação de uma barragem de aterro

Miriam Lopes
Engenheira geotécnica, JETsj, Lisboa, Portugal, mlopes@jetsj.com

Fábio Silva
Gerente Técnico, JETbr, Belo Horizonte, Brasil, fsilva@jetsj.com

Nuno Braz da Silva
Diretor Técnico, JETbr, Lisboa, Portugal, nsilva@jetsj.com

Cláudio Barbosa
Engenheiro Geólogo - Geotécnico, Vale, Belo Horizonte, Brasil, C0663734@vale.com

Marcos Vinicius de Souza Silva
Engenheiro Geólogo - Geotécnico, Vale, Belo Horizonte, Brasil, Marcos.Vinicius.Silva1@vale.com

RESUMO: O aterro com aproximadamente 90m de altura que constitui o corpo de uma barragem de rejeitos, localizada em Minas Gerais, Brasil, encontra-se parcialmente assente sobre solos residuais caracterizados por reduzida resistência e elevada deformabilidade. Visando assegurar a estabilidade de todo o conjunto da barragem e estrutura de fundação e limitar potenciais recalques diferenciais, foram concebidas soluções de tratamento dos solos de fundação, destacando-se a execução de colunas de brita injetadas. A avaliação do desempenho do conjunto solo *in situ* e colunas de brita injetadas foi realizada através de um ensaio de carga estático sobre um grupo de sete colunas, submetidas a uma carga máxima de 10 000 kN, aplicada mediante oito macacos hidráulicos e um bloco em concreto com 9 m² de área. O plano de instrumentação contemplou extensômetros distribuídos ao longo das colunas e no solo confinante, células de pressão total, células de carga e réguas potenciométricas, integrados num sistema automatizado de monitoramento contínuo. Os resultados permitiram avaliar o comportamento tensão-deformação do compósito formado pelo conjunto de colunas e do solo confinado entre as colunas, concluindo-se que a realização dos ensaios de carga prévios dos tirantes de reação condicionou o desempenho observado, introduzindo desvios face ao comportamento esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Colunas de brita injetadas, Prova estática de carga, Tratamento de fundação, Sistema automatizado de monitoramento.

ABSTRACT: An approximately 90 m high earthfill dam, forming part of a tailings storage facility (TSF) in Minas Gerais, Brazil, is partially founded on residual soils with low undrained shear strength and high compressibility. To ensure global stability of the dam–foundation system and to control differential settlements, ground improvement was implemented, with particular emphasis on grouted stone columns. The in-situ response of the soil–column composite was evaluated by a static load test on a seven-column group, loaded to 10.000,0kN using eight hydraulic jacks reacting against a 9 m² concrete reaction block. Instrumentation comprised extensometers within selected columns and in the surrounding soil, total stress (pressure) cells, load cells and displacement transducers, all connected to an automated continuous acquisition system. The measurements enabled assessment of load transfer and stress–strain response of the composite mass formed by the columns and the confined soil within the group. The results also indicated that prior proof-loading of the reaction anchors altered the initial stress state and stiffness of the test domain, introducing a systematic bias relative to the behaviour expected under “virgin” loading conditions.

KEYWORDS: Grouted stone columns, Static load test, Foundation treatment, Automated monitoring system.

1 INTRODUÇÃO

Barragens de aterro implantadas sobre solos residuais apresentam, frequentemente, desafios significativos do ponto de vista geotécnico, associados à reduzida resistência e elevada deformabilidade dos materiais de fundação. Em estruturas de grande porte, estas condicionantes podem traduzir-se em problemas de estabilidade global e em recalques diferenciais excessivos, com impacto direto no desempenho e na segurança da obra.

Entre as diversas soluções de melhoramento de solos disponíveis, a execução de colunas de brita injetadas (CBI) é uma possível técnica a aplicar, particularmente em contextos onde se pretende aumentar a rigidez do maciço de fundação, melhorar a capacidade de carga e promover uma redistribuição mais favorável das tensões aplicadas. O comportamento deste tipo de solução resulta da interação complexa entre as colunas e o solo envolvente, formando um compósito cujo desempenho não é, muitas vezes, plenamente captado por abordagens de dimensionamento baseadas exclusivamente em métodos empíricos ou analíticos simplificados.

Neste enquadramento, os ensaios de carga estática in situ assumem um papel fundamental na validação das soluções de tratamento adotadas, permitindo avaliar diretamente o comportamento tensão–deformação do conjunto solo–colunas, bem como a repartição de cargas entre os diferentes elementos do sistema. Apesar da sua relevância, a documentação técnica disponível na literatura relativa a ensaios de carga realizados sobre grupos de colunas de brita, especialmente com instrumentação extensiva, é ainda relativamente limitada.

O presente trabalho apresenta os resultados de um ensaio de carga estática realizado in situ sobre um grupo de sete colunas de brita injetadas, executadas como solução de tratamento de fundação de uma barragem de aterro de grande altura. O ensaio foi concebido de modo a mobilizar níveis de tensão representativos das condições de serviço e de estado limite último previstas em projeto, recorrendo a um plano de instrumentação abrangente que incluiu a medição de deslocamentos, deformações internas e tensões no solo e nas colunas.

O principal objetivo do estudo consiste em caracterizar o comportamento mecânico do compósito formado pelas colunas de brita injetadas e pelo solo confinado entre elas, analisando a sua resposta global e os mecanismos de transferência de carga mobilizados. Adicionalmente, são discutidas as limitações e condicionantes associadas à execução do ensaio, nomeadamente a influência de ações prévias nos elementos de reação, e as implicações destes aspetos na interpretação dos resultados obtidos.

2 ENQUADRAMENTO GEOTÉCNICO GERAL

A barragem de aterro em estudo de aproximadamente de 90 m de altura, encontra-se implantada numa área onde a fundação é constituída, de forma significativa, por solos residuais. Estes solos apresentam-se, na zona de talvegue, como de reduzida resistência ao cisalhamento e de elevada deformabilidade, características que condicionam de forma determinante o desempenho de estruturas de aterro de grande altura.

A variabilidade espacial dos materiais de fundação, associada à presença de diferentes horizontes residuais e a transições graduais para o maciço rochoso subjacente, traduz-se numa resposta mecânica heterogênea quando sujeita às solicitações impostas pelo peso próprio do aterro. Neste contexto, a ocorrência de recalques diferenciais e a mobilização não uniforme das tensões constituem preocupações centrais no dimensionamento e na execução da obra.

As análises de projeto evidenciaram que, nas zonas onde a espessura dos solos residuais é mais significativa, o comportamento deformacional da fundação poderia assumir um papel condicionante, tanto em termos de deformações admissíveis como de margens de segurança aos estados limite últimos (Silva *et al*., 2024). Face a este enquadramento, tornou-se necessário adotar uma solução de tratamento dos solos de fundação capaz de melhorar o desempenho global do conjunto, assegurando simultaneamente níveis de rigidez e capacidade de carga compatíveis com as exigências da estrutura.

A solução selecionada baseou-se na execução de colunas de brita injetadas, dispostas segundo uma malha regular, visando a constituição de um maciço reforçado com comportamento compósito. A metodologia de execução das referidas colunas é apresentada em Brumano *et al*. (2024). Esta abordagem permite reduzir a deformabilidade global da fundação, promover uma redistribuição mais eficiente das tensões aplicadas e limitar a magnitude dos recalques diferenciais, mantendo um adequado nível de segurança.

Neste enquadramento, a compreensão do comportamento real do sistema solo–colunas, sob níveis de carga representativos das condições de serviço e de estado limite último, assume particular relevância para a validação das hipóteses de projeto e para a calibração dos parâmetros geotécnicos adotados. O ensaio de carga estática descrito nas seções seguintes insere-se precisamente neste contexto, constituindo um elemento fundamental de apoio à avaliação do desempenho da solução de tratamento implementada.

3 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE CARGA ESTÁTICA

O ensaio de carga estática foi concebido com o objetivo de avaliar o comportamento global do sistema de fundação reforçado com colunas de brita injetadas, incluindo a integridade estrutural das colunas, sob níveis de solicitação representativos das condições de serviço e de dimensionamento previstas em projeto. O ensaio incidiu sobre um grupo de sete colunas, consideradas representativas da solução de tratamento adotada. A localização do ensaio de carga, no contexto da área alvo de tratamento com colunas de brita injetadas, encontra-se ilustrada na Figura 1.

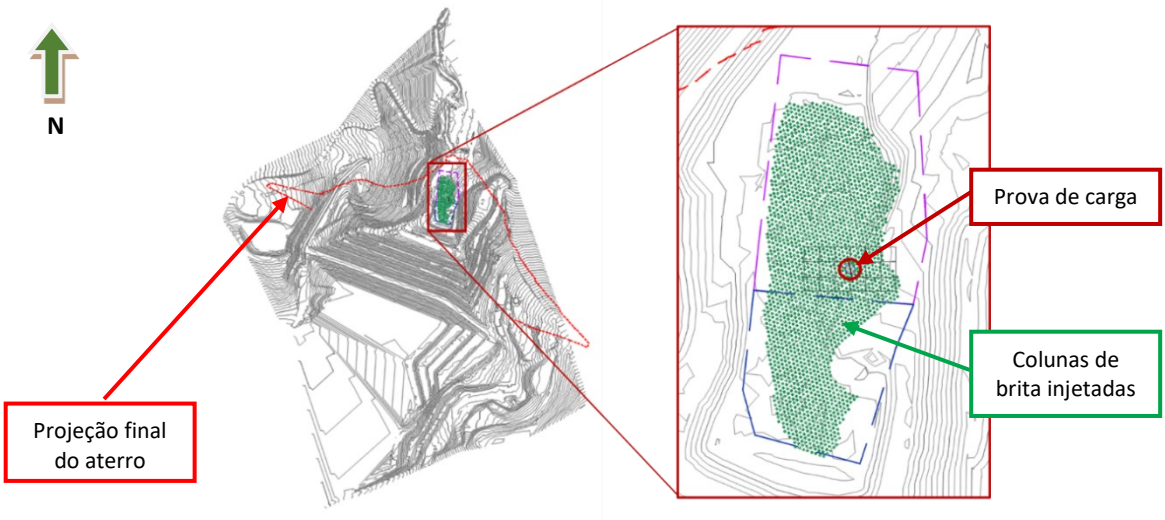


Figura 1. Planta de localização da prova de carga (sem escala)

3.1 Geometria do ensaio e sistema de carregamento

O carregamento foi aplicado através de um bloco rígido em concreto armado, apoiado diretamente sobre uma camada de areia, com 1,00 m de espessura, disposta sobre o topo das colunas e do solo envolvente, com uma geometria hexagonal com uma área aproximada de 9 m² e 1,00 m de altura. A geometria do bloco foi definida de modo a garantir uma distribuição aproximadamente uniforme das tensões aplicadas sobre o conjunto ensaiado, minimizando efeitos de flexão ou rotações indesejáveis durante o carregamento.

A aplicação da carga vertical foi realizada por intermédio de um conjunto de macacos hidráulicos acionados individualmente, associados a um sistema de reação constituído por tirantes ancorados em profundidade. O acionamento independente dos macacos permitiu controlar a horizontalidade do bloco ao longo de todo o ensaio, acomodando eventuais diferenças de rigidez entre as colunas e o solo de fundação. A Figura 2 apresenta o registo fotográfico da estrutura da prova de carga e dos macacos hidráulicos utilizados.

A carga máxima aplicada ao conjunto foi da ordem de 10 000 kN, correspondente a níveis de tensão compatíveis com os valores de dimensionamento considerados para a fundação da barragem. O carregamento foi efetuado de forma incremental, com controle rigoroso das forças aplicadas e dos deslocamentos induzidos.



Figura 2. Registo fotográfico da estrutura da prova de carga (à esquerda) e dos macacos hidráulicos utilizados (à direita)

3.2 Características das colunas de brita injetadas alvo de ensaio

Com base nos registos de execução das CBI, foi possível estimar a geometria final das colunas alvo do ensaio, a partir das quantidades de brita consumidas em profundidade. Os resultados indicam que as colunas ensaiadas apresentam diâmetros finais variáveis entre 0,86 m e 1,28 m e comprimentos compreendidos entre 6,01 m e 7,46 m. Na Figura 3 apresenta-se a geometria estimada de três das sete colunas ensaiadas, com base nos registos de execução.

A rigidez da mistura calda de cimento–brita foi estimada a partir de ensaios laboratoriais de resistência à compressão simples, tendo-se obtido um valor aproximado de 1 GPa.

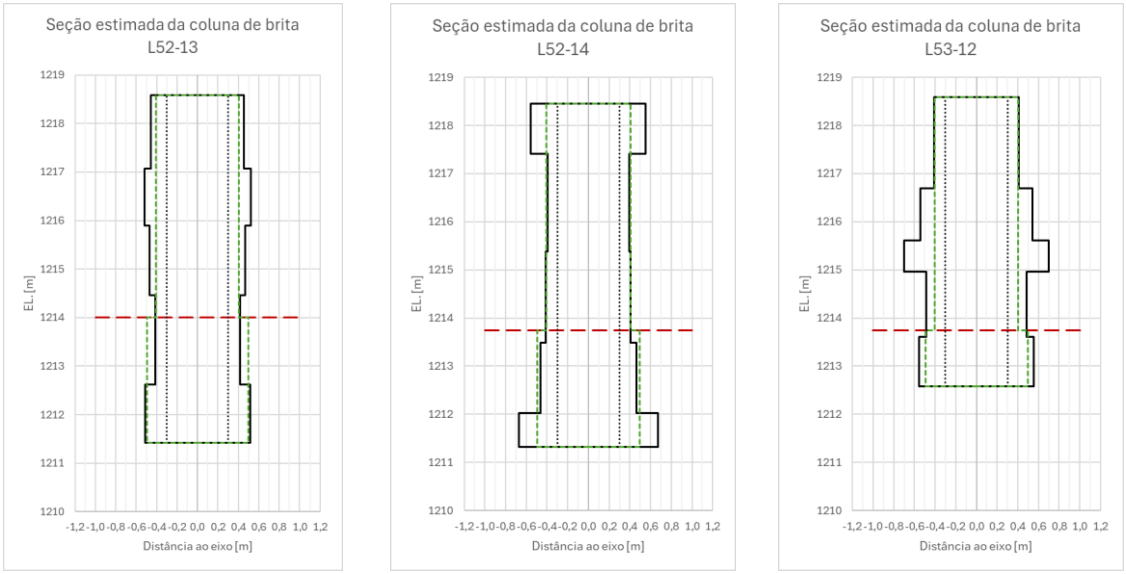


Figura 3. Geometria de parte das CBI alvo de ensaio

3.3 Plano de carregamento e descarregamento

O ensaio foi realizado segundo um procedimento de carregamento cíclico lento, conforme definido na norma ABNT NBR 16903 com sucessivos ciclos de carga e descarga, permitindo avaliar a evolução da rigidez do conjunto e identificar eventuais fenómenos de plastificação progressiva. Foram previstos vários ciclos com incrementos de carga crescentes, culminando num ciclo final destinado a mobilizar níveis de solicitação próximos dos estados limite últimos.

Em cada patamar de carga, a força aplicada foi mantida até à estabilização dos deslocamentos verticais, de acordo com critérios usuais em ensaios de carga estática, garantindo a leitura adequada do comportamento deformacional do sistema. A descarga foi igualmente efetuada de forma faseada, permitindo analisar a recuperação elástica e a eventual existência de deformações residuais acumuladas ao longo do ensaio.

Durante a execução do ensaio ocorreram algumas interrupções e ajustes operacionais associados ao sistema de carregamento e de reação, que conduziram a ligeiras alterações face ao plano inicialmente previsto. Estas ocorrências, inerentes a ensaios *in situ* desta complexidade, foram devidamente registradas e consideradas na análise crítica dos resultados, discutida em seções posteriores.

3.4 Plano de instrumentação e aquisição de dados

Com o objetivo de permitir uma caracterização detalhada do comportamento do conjunto ensaiado, foi implementado um plano de instrumentação abrangente, integrando diferentes tipos de sensores instalados nas colunas de brita, no solo envolvente e no sistema de carregamento.

Foram instalados doze extensômetros ao longo do comprimento de três colunas de brita, bem como quatro extensômetros no solo confinado entre colunas, dispostos em dois alinhamentos verticais, visando a medição das deformações axiais internas e a avaliação da transferência de carga em profundidade.

Adicionalmente, foram instaladas quatro células de pressão total no topo das colunas e quatro no solo entre colunas, possibilitando a quantificação direta da repartição das tensões verticais aplicadas ao sistema.

A carga mobilizada em cada macaco hidráulico foi monitorizada por células de carga, assegurando a medição das forças aplicadas ao bloco de concreto. Os deslocamentos verticais globais foram registrados por quatro réguas potenciométricas instaladas no bloco, com verificações topográficas pontuais como controle.

Todos os sensores foram integrados num sistema automatizado de aquisição de dados, permitindo monitorização contínua durante o ensaio e suportando a interpretação consistente da resposta do sistema solo–colunas apresentada nas seções seguintes.

Na Figura 4, apresenta-se a planta e a secção transversal da estrutura da prova de carga, com a identificação dos diferentes sensores instalados.

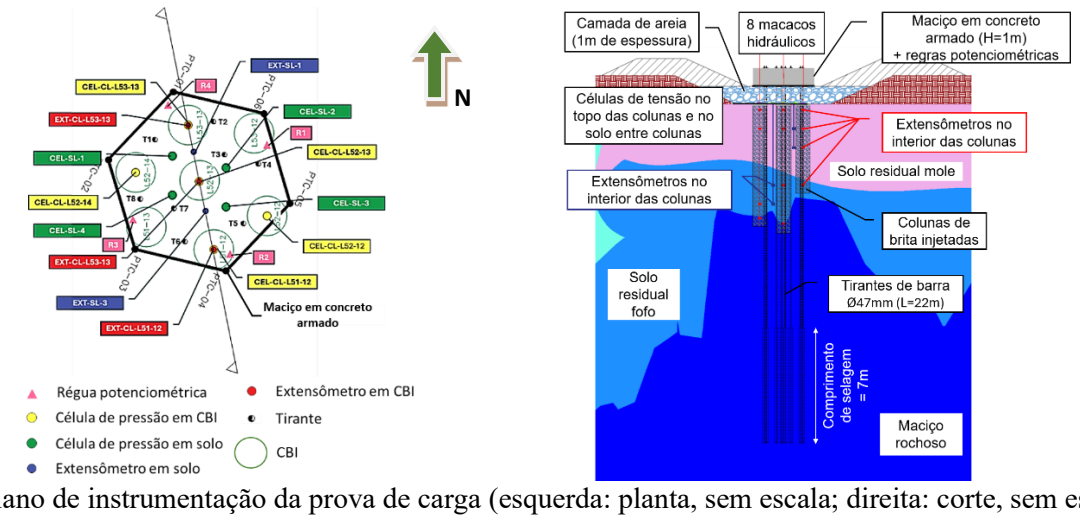


Figura 4. Plano de instrumentação da prova de carga (esquerda: planta, sem escala; direita: corte, sem escala)

4 RESULTADOS DO ENSAIO

4.1 Comportamento global carga–recalque

A resposta global do conjunto ensaiado foi analisada a partir da relação entre a carga aplicada e os deslocamentos verticais medidos no bloco em concreto. A curva carga–recalque, apresentada na Figura 5 evidencia um comportamento aproximadamente linear, não sendo observada uma perda de rigidez significativa à medida que os níveis de carga aumentam. A Figura 6 apresenta a evolução do deslocamento vertical medido nas réguas potenciométricas e da carga total aplicada durante o ensaio.

Para níveis de solicitação correspondentes às condições de serviço, os recalques observados mantiveram-se limitados, indicando um desempenho compatível com os critérios de utilização considerados em projeto. Em cargas mais elevadas, próximas dos valores máximos aplicados, verificou-se uma maior

contribuição das deformações plásticas, refletida na acumulação de recalques residuais após os ciclos de descarga.

Este comportamento global traduz uma resposta relativamente rígida do conjunto ensaiado, superior àquela que seria expectável considerando exclusivamente a deformabilidade dos solos residuais de fundação e a contribuição das CBI, sugerindo a influência de fatores externos ao sistema solo–colunas propriamente dito.

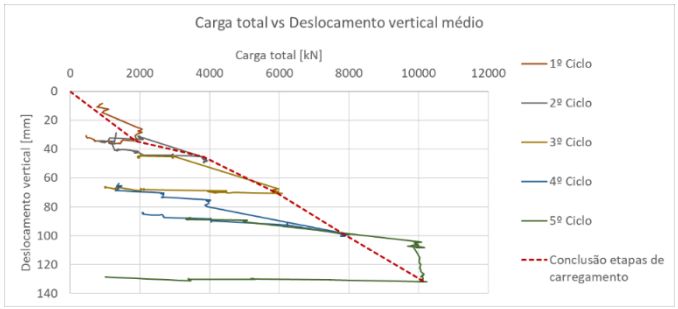


Figura 5. Curva força x recalque (evolução da carga total registrada nas células de carga e deslocamento médio medido nas réguas potenciométricas).

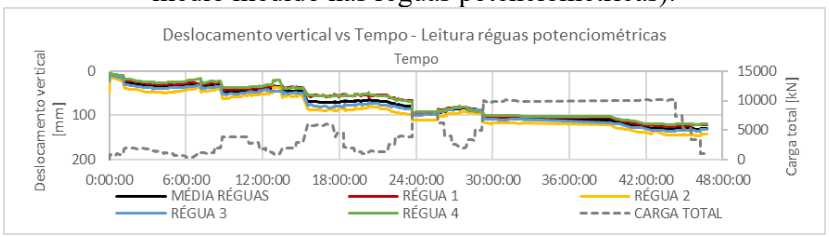


Figura 6. Evolução do deslocamento vertical medido nas réguas potenciométricas instaladas para medição dos deslocamentos verticais do bloco em concreto

4.2 Repartição de cargas entre colunas e solo

As medições efetuadas através das células de pressão total permitiram avaliar a repartição das tensões verticais entre as CBI e o solo confinado entre colunas. Os resultados indicam que, desde os níveis iniciais de carregamento, o solo mobilizou uma parcela superior da solicitação aplicada.

Com base nos valores médios de tensão registrados nas células de pressão e nas áreas correspondentes sob a base do bloco — estimadas em 4,55 m² para as CBI e 4,44 m² para o solo entre colunas — foram calculadas as cargas totais mobilizadas em cada componente do sistema. A análise dos resultados, ilustrada na Figura 7, permite estimar que aproximadamente 40% da carga total aplicada foi transmitida às CBI e cerca de 60% ao solo existente entre colunas, ao longo da generalidade das etapas do ensaio.

De forma a verificar a coerência dos resultados, a carga total estimada a partir da soma das parcelas mobilizadas nas colunas e no solo foi comparada com a carga total medida pelas células de carga instaladas nos tirantes. A boa concordância obtida entre ambas as estimativas, corrobora a validade da ordem de grandeza das tensões medidas pelas células de pressão.

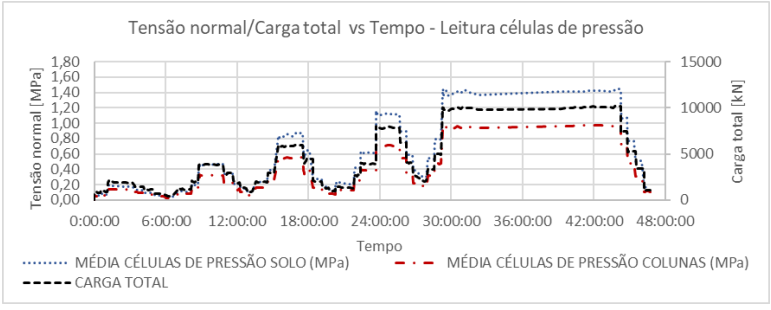


Figura 7. Evolução da carga total aplicada no ensaio e dos valores médios das tensões normais medidas nas células de pressão instaladas no solo entre colunas e nas CBI.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Repartição de tensões e divergência face ao comportamento esperado

A análise das tensões normais medidas pelas células de pressão instaladas no topo das colunas e no solo entre colunas evidencia um resultado divergente do esperado: em média, as tensões registradas no solo entre colunas foram superiores às tensões medidas no coroamento das colunas. Este comportamento contraria o mecanismo geralmente esperado em fundações reforçadas com inclusões mais rígidas, no qual se verifica concentração de tensões nas colunas por efeito de arco.

A explicação mais plausível reside na alteração do estado inicial de tensões do sistema induzida pelos ensaios prévios dos tirantes de reação — obrigatórios ao abrigo da ABNT NBR 5629:2018 — que terão imposto um pré-carregamento e/ou uma pré-deformação no solo entre colunas. Esse "pré-condicionamento" tende a aumentar a rigidez secante aparente do solo confinado entre colunas (por recompressão local e eventual reorganização estrutural), reduzindo a mobilização relativa de rigidez das colunas durante a prova de carga principal e, consequentemente, condicionando a repartição de tensões observada, com transferência de carga mais significativa para o solo entre colunas do que a prevista num cenário de carregamento "virgem".

5.2 Coerência global das forças medidas e limitações de interpretação

A comparação entre a carga total aplicada medida pelas células de carga instaladas nos tirantes e a carga total estimada a partir das tensões medidas nas células de pressão evidenciou, na generalidade, boa concordância. Foram, no entanto, observadas discrepâncias pontuais superiores a 20%, sobretudo em fases de descarga e no 1.º ciclo, possivelmente associadas à dissipação parcial de carga por atrito lateral nas faces do bloco em concreto.

5.3 Incerteza na rigidez estimada das colunas a partir das extensões medidas

A estimativa do módulo de elasticidade equivalente das colunas, efetuada a partir da relação $E = \sigma/\varepsilon$, conjugando as extensões medidas no troço superior com as tensões registradas no topo, conduziu a valores de E de magnitude muito superior à esperada face aos ensaios laboratoriais realizados às caldas.

Esta incoerência sugere incerteza na fiabilidade das leituras dos extensômetros, pelo que não foi desenvolvida uma análise detalhada da transmissão de carga em profundidade (através de atrito lateral e ponta), sendo a interpretação centrada na resposta global do conjunto

5.4 Comportamento global carga–recalque e rigidez do conjunto

A curva carga–recalque evidenciou uma resposta global consistente e sem indícios de rotura, com comportamento qualitativamente semelhante ao longo dos vários ciclos de carga e descarga. Não se observaram anomalias indicativas de falha do sistema, destacando-se o desempenho satisfatório até à carga máxima aplicada, para a qual se registou um deslocamento vertical médio no topo do bloco da ordem de 130 mm.

A resposta em fase de incremento de carga mostrou-se muito semelhante em todos os ciclos, evidenciando uma componente elástica dominante. Em fase de descarga verificou-se, igualmente, um comportamento coerente, embora com maior amplitude de deslocamentos e com acumulação progressiva de deformações plásticas entre ciclos.

Registraram-se dificuldades operacionais no controle da carga instalada em alguns patamares, associadas ao sistema hidráulico, as quais contribuíram para alguma inconstância pontual dos valores de carga.

A rigidez vertical do conjunto, estimada por regressão linear das fases de incremento de carga, resultou em $K_v \approx 80.954{,}00$ kN/m. Quando comparada com a rigidez estimada em projeto, o ensaio evidenciou uma rigidez aproximadamente 1,8 vezes superior, confirmando uma resposta global mais rígida do que a inicialmente prevista.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio de carga estática in situ realizado sobre um grupo de sete colunas de brita injetadas (CBI) permitiu caracterizar o comportamento global do compósito constituído pelas colunas e pelo solo residual confinado, sob níveis de carregamento representativos das condições de projeto.

A resposta global do sistema evidenciou um comportamento estável, sem indícios de rotura, registrando-se um deslocamento vertical no topo do bloco de reação em concreto da ordem de 130 mm para a carga máxima aplicada. A rigidez vertical secante estimada foi de 80.954,00 kN/m, aproximadamente 1,8 vezes superior à prevista em projeto, indicando um desempenho global mais favorável do que o inicialmente assumido.

A repartição de tensões inferida a partir das células de pressão evidenciou uma mobilização média de cerca de 60% da carga no solo entre colunas e 40% nas colunas, resultado não alinhado com o mecanismo clássico esperado para inclusões mais rígidas, onde tipicamente se verifica concentração de tensões nas colunas por efeito de arqueamento. A explicação tecnicamente mais plausível para este desvio está associada ao pré-carregamento do solo entre colunas induzido pelos ensaios prévios dos tirantes de reação, os quais poderão ter modificado o estado inicial de tensões e a rigidez secante aparente do maciço no domínio de influência do sistema de reação.

A análise das extensões medidas no interior das colunas revelou incoerências quando conjugada com as tensões medidas no topo, conduzindo a estimativas de módulo de elasticidade equivalente excessivamente elevadas face à caracterização laboratorial das caldas. Em face desta limitação, não foi possível desenvolver uma interpretação robusta da transferência de carga em profundidade (atrito lateral e ponta), tendo-se privilegiado a leitura integrada da resposta global carga–recalque e a coerência global do balanço de forças medido ao nível do topo.

Em síntese, o ensaio confirmou o bom desempenho global do tratamento por CBI, evidenciando que as exigências de rigidez e de capacidade de carga estabelecidas em projeto foram satisfeitas. Em paralelo, os resultados reforçam a necessidade de considerar criticamente as condições iniciais de carregamento, bem como as limitações instrumentais e de configuração do sistema de reação, na interpretação de ensaios in situ de grande escala.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale, na qualidade de dono de obra, a autorização concedida para a publicação do presente artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Silva, F., Lopes, M. e Silva, N. B. (2024). *Análises de Tensão-deformação do Tratamento de Fundações de uma Barragem de Rejeito com Colunas de Brita Injetadas*. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Disponível em <https://2024.cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados>. Acesso em 03 fev. 2026.

Brumano, F., Felix dos Santos, M. e Oliva, R. (2024). *Metodologia Executiva de Colunas de Brita Injetadas com Nata de Pega Rápida para Reforço de Fundações de Barragem de Rejeitos*. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Disponível em <https://2024.cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados>. Acesso em 03 fev. 2026.