DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/58

QA/QC em Obras de *Jet Grouting*: Um Caso Inédito de Melhoria do Solo de Fundação de uma Barragem Brasileira

Fernando Carolino da Silva
M.Sc. Geotecnia e Engenheiro Geotécnico, Mosaic, Catalão, Brasil, fernandocarolinodasilva@hotmail.com

Wagton Resende da Silveira
Coordenador de Operação e Geotécnico, Mosaic, Catalão, Brasil, wagton.silveira@mosaicco.com

Thiago Moura de Queiroz Oliveira
Gerente Geotecnia, Mosaic, Araxá, Brasil, Thiago.Oliveira20@mosaicco.com

Guilherme Giorgi Alves Pereira
Coordenador, Patos Fosfatados, Patos de Minas, Brasil, ggpereira@fosfatadosbr.com.br

Otávio Palhares Quinaud Pedron
Gerente de Operação, Mosaic, Catalão, Brasil, otavio.pedron@mosaicco.com

RESUMO: Este artigo apresenta diretrizes para a implementação de procedimentos de Garantia da Qualidade (QA) e Controle da Qualidade (QC) em projetos que envolvem a técnica de *jet grouting*, com foco na melhoria das propriedades geotécnicas de solos fracos em fundações de barragens. Essas duas abordagens são complementares e devem ser integradas por meio de procedimentos como amostragem, ensaios laboratoriais e inspeções de campo, que auxiliam na verificação da conformidade com os critérios de desempenho estabelecidos. A técnica de *jet grouting* é particularmente sensível a três principais fontes de incerteza: (i) a eficácia do tratamento, relacionada às dimensões e propriedades dos elementos injetados; (ii) a interação mecânica entre os corpos de solo tratados e os solos adjacentes, a qual determina o comportamento global da fundação reforçada; e (iii) os potenciais impactos ambientais, especialmente sobre estruturas vizinhas. Com base em um estudo de caso inédito aplicado à fundação de uma barragem de mineração no Brasil, este artigo apresenta uma proposta estruturada de QA/QC para obras de *jet grouting*, destacando os principais desafios, critérios de aceitação e estratégias de monitoramento adotadas para garantir a segurança integral da estrutura da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração, Nível de Emergência e Tratamento de Fundação.

ABSTRACT: This article presents guidelines for implementing Quality Assurance (QA) and Quality Control (QC) procedures in projects involving jet grouting, with a focus on improving the geotechnical properties of weak soils in dam foundations. These two approaches are complementary and should be integrated through procedures such as sampling, laboratory testing, and field inspections, which support the verification of compliance with established performance criteria. The jet grouting technique is particularly sensitive to three main sources of uncertainty: (i) the effectiveness of the treatment, related to the dimensions and properties of the injected elements; (ii) the mechanical interaction between the treated soil bodies and the surrounding soils, which governs the overall behavior of the reinforced foundation; and (iii) potential environmental impacts, especially on neighboring structures. Based on an unprecedented case study applied to the foundation of a mining dam in Brazil, this article presents a structured QA/QC framework for jet grouting works, highlighting the main challenges, acceptance criteria, and monitoring strategies adopted to ensure the overall safety of the dam structure.

KEYWORDS: Mining, Emergency Level and Foundation Treatment.

1 INTRODUÇÃO

A Garantia da Qualidade (*Quality Assurance — QA*) e o Controle da Qualidade (*Quality Control — QC*) desempenham papel essencial na indústria da construção civil, assegurando que os projetos atendam aos

requisitos de segurança, funcionalidade e durabilidade previstos em projeto. No contexto geotécnico, a implementação eficaz de procedimentos de QA-QC durante a execução é fundamental para a obtenção de sistemas seguros e de desempenho previsível. Segundo Gilbert *et al.* (2018), o professor Wilson H. Tang foi um dos principais responsáveis por avanços nesse campo, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento de diretrizes de controle em diversas áreas, incluindo soldagem de elementos metálicos (Tang, 1973), geomembranas (Tang, 1993) e fundações profundas (Zhang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008). Seu trabalho também enfatiza, de forma abrangente, os princípios do QA-QC em seu livro-texto de referência (Ang e Tang, 2007).

Na prática, um dos maiores desafios do QA-QC está em lidar com a variabilidade e as incertezas inerentes aos materiais e aos processos construtivos, o que exige o uso adequado de ferramentas de probabilidade e estatística para apoiar a tomada de decisão. Segundo Gilbert *et al.* (2018), entre as questões fundamentais que orientam os procedimentos de controle de qualidade, destacam-se: i) Quais critérios devem ser empregados para aceitação ou rejeição de um produto com base nos resultados obtidos? ii) Quais são as probabilidades associadas à aceitação incorreta de um produto inadequado ou à rejeição indevida de um produto conforme?

Portanto, o objetivo central dos procedimentos de QA-QC é assegurar que os produtos finais atendam aos requisitos de desempenho para os quais foram projetados. Para isso, tanto o Controle da Qualidade (CQ) quanto a Garantia da Qualidade (GQ) são estruturalmente organizados por meio de manuais técnicos que estabelecem diretrizes, ensaios padronizados e critérios de aceitação e rejeição aplicáveis em diferentes etapas do processo de execução. Esses procedimentos buscam avaliar a conformidade dos materiais empregados, a eficiência das atividades executivas e a aderência aos parâmetros definidos em projeto.

De acordo com Croce *et al.* (2014), no caso específico das obras que empregam a técnica de jet grouting, os sistemas de controle devem ser estruturados com base nos seguintes objetivos principais: i) garantir que os materiais utilizados apresentem propriedades compatíveis com o processo; ii) verificar a conformidade dos procedimentos executivos e da operação dos equipamentos; iii) determinar as dimensões geométricas e as propriedades geotécnicas dos elementos injetados; iv) avaliar o desempenho estrutural dos elementos produzidos; v) monitorar os efeitos ambientais e as influências sobre estruturas vizinhas.

Diante da ausência de diretrizes consolidadas sobre QA-QC aplicadas ao *jet grouting* na literatura técnica brasileira, este artigo tem como objetivo apresentar orientações práticas e critérios de controle voltados para essa técnica de melhoria do solo. Além disso, é apresentado um estudo de caso de uma obra executada no Brasil, na qual os procedimentos aqui descritos foram aplicados de forma rigorosa. Este estudo demonstra a eficácia do controle de qualidade na execução de colunas de jet grouting, contribuindo para a segurança do processo construtivo e para a melhoria das propriedades do solo de fundação de uma barragem nacional.

2 METODOLOGIA: DIRETRIZES DE QA/QC PARA OBRAS DE *JET GROUTING*

2.1 Critérios Gerais

Esta seção apresenta as principais diretrizes para planejamento, monitoramento e controle da qualidade (QA/QC) na execução de tratamentos por *jet grouting*, com base no guia técnico de Croce *et al.* (2014). O documento reúne recomendações de entidades como a *Japanese Jet Grouting Association* (JJGA) e o *Grouting Committee do Geo-Institute da American Society of Civil Engineers* (ASCE), abrangendo critérios de projeto, execução, controle e especificações de materiais em conformidade com normas ASTM e AASHTO. Adicionalmente, os procedimentos devem atender aos requisitos da Norma Europeia EN 12716, que estabelece padrões de execução e desempenho para obras de *jet grouting*. A consolidação dessas referências fornece a base necessária para um sistema de QA/QC robusto, permitindo avaliar a conformidade dos parâmetros operacionais, dos materiais utilizados e das propriedades geométricas e geotécnicas das colunas tratadas. Dessa forma, garante-se que o processo de jet grouting seja conduzido com rastreabilidade, repetibilidade e desempenho compatível com as condições de projeto e com as exigências normativas internacionais.

2.1 Caracterização da Obra e Projeto

Para viabilizar a retirada do nível de emergência de uma barragem de mineração no Brasil, foi adotada uma solução baseada na execução de colunas de jet grouting para melhorar as propriedades geotécnicas de um

depósito aluvionar de baixa resistência presente na fundação do barramento. Este tópico apresenta as principais etapas, procedimentos, definições e verificações que compuseram a intervenção. Embora não constitua o foco principal deste artigo, o caso permite descrever de forma sistematizada os procedimentos de QA/QC adotados, fundamentais para assegurar a qualidade, a rastreabilidade e a segurança das atividades executadas.



Figura 1. Governança e QA/QC de Obras Geotécnicas (Autores).

Conforme ilustrado na Figura 1, a execução geotécnica segura e eficiente requer uma governança técnica robusta associada a um sistema de QA/QC bem estruturado. A figura apresenta os pilares que sustentam o ciclo de vida da obra — Projetos, Implementação, Monitoramento e Manutenção e Gestão de Informações — evidenciando sua contribuição para a qualidade, a rastreabilidade e a tomada de decisão técnica. A integração desses pilares possibilitou a implementação do jet grouting na fundação do barramento com elevados padrões de qualidade, segurança e controle. As seções seguintes descrevem os procedimentos, controles e resultados obtidos, demonstrando a efetividade do sistema de governança e QA/QC adotado.

A Figura 2 apresenta uma visão geral da estrutura em estudo, destacando três elementos principais: (i) a área que demandou tratamento por jet grouting; (ii) a área destinada ao canteiro de obras; e (iii) a região prevista para a execução das colunas de teste. Esses elementos são detalhados nos tópicos subsequentes para contextualizar sua relevância na implantação da solução adotada.

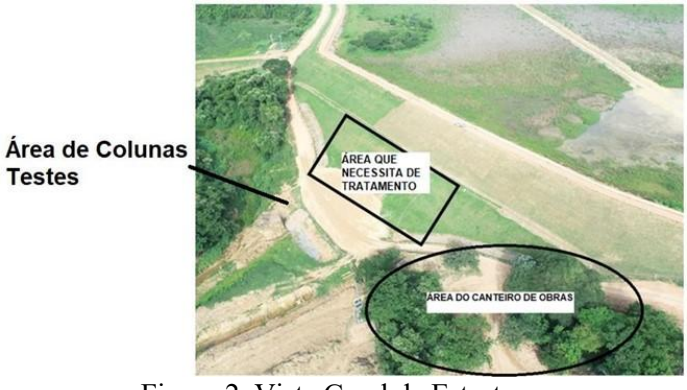


Figura 2. Vista Geral da Estrutura.

As características apresentadas a seguir foram determinantes para o projeto e permaneceram inalteradas durante toda a obra:

- Dimensões e parâmetros das colunas: adotou-se diâmetro nominal de 80 cm e relação água/cimento de 1:1, sem utilização de aditivos.

- Solicitações estruturais: não foi necessário reforço adicional, uma vez que as colunas são submetidas predominantemente a esforços de cisalhamento, sem tração ou flexão significativas.
- Refluxo do material injetado: o material grouteado e o solo erodido retornam à superfície pelo espaço anular entre as hastes e a parede do furo, formando o refluxo característico do processo. A ocorrência de refluxo moderado é essencial para garantir a eficiência do tratamento e evitar o entupimento do furo. Parte desse material foi utilizada na moldagem de corpos de prova para ensaios laboratoriais.
- Metodologia de execução: não foi permitida a utilização de ar comprimido durante a injeção.

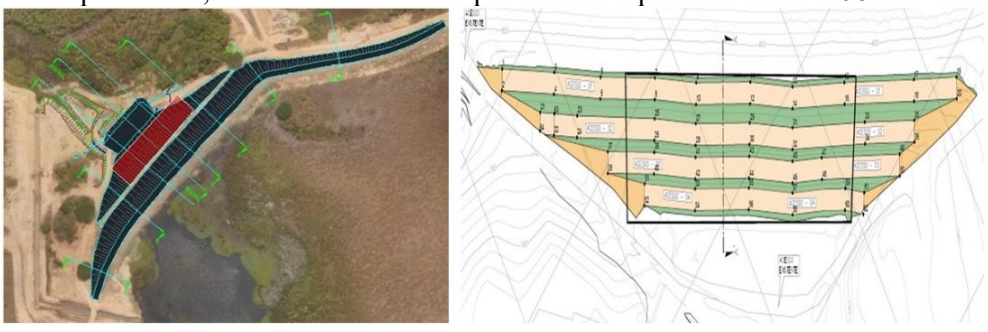
A execução do *jet grouting* requer controle rigoroso de parâmetros operacionais, como rotação do equipamento e pressão de injeção. Os valores adotados, apresentados na Tabela 1, foram validados por meio das colunas teste, sendo a parametrização final definida pela empresa especializada responsável pela execução.

Tabela 1. Valores típicos dos parâmetros de tratamento.

Parâmetro de Tratamento	Símbolo	Unidade	Fluido Simples
Etapa de elevação	Δs	mm	40–50
Velocidade média de elevação	vr	mm/s	4–10
Velocidade rotacional	ω	rpm	5– 40
Diâmetro do bico	d	mm	2–8
Número de bicos	M	-	1–2
Pressão de Groute	pg	MPa	30–55
Pressão do ar	pa	MPa	-
Pressão da água	pw	MPa	-
Taxa de fluxo de groute	Qg	L/s	2–10
Taxa de fluxo de ar	Qa	L/s	-
Taxa de fluxo de água	Qw	L/s	-
Relação A/C por peso	A/C	-	0,60–1,25

Foram estabelecidos os seguintes critérios de estabilidade e controle:

- Os parâmetros de resistência adotados em projeto foram validados por critérios conservadores, utilizando o modelo de Mohr-Coulomb (c = 0,3 MPa e φ = 28°).
- A metodologia adotada mostrou-se adequada para a solução do problema técnico, sem gerar impactos ambientais negativos relevantes.
- No contexto do QA/QC da obra, destacam-se os seguintes aspectos:
- Perfuratriz: capacidade de operação e deslocamento em taludes.
- Colunas de *jet grouting*: o projeto definiu o tratamento da área indicada na Figura 3a para melhoria do depósito aluvionar presente na fundação da barragem.
- Acessos: foram implantados quatro acessos construtivos (Figura 3b), com 4 m de largura cada, permitindo o deslocamento da perfuratriz e a execução de três linhas de colunas por acesso. Para garantir a estabilidade operacional, os acessos foram compactados até aproximadamente 95%.



(a) (b)

Figura 3. a) Região de Tratamento; b) Acessos.

Quanto ao sequenciamento construtivo, considerando o espaçamento de 1,40 m entre os centros das colunas de uma mesma linha (ou linhas adjacentes) e de 1,20 m entre linhas (Figura 4a), foi definida a seguinte metodologia de execução:

- A execução deve iniciar pela Linha 3, próxima ao bordo da berma, para avaliação do comportamento da estrutura.
- Após a execução da coluna 01, avança-se sete posições para a execução da coluna 02 (Figura 4b).
- A coluna 03 é executada na Linha 1, posicionada entre as colunas 01 e 02, repetindo-se o avanço de sete posições para a execução da coluna 04.
- Na Linha 2, a coluna 05 é executada com deslocamento de uma posição em relação à coluna 01 da Linha 3 e, em seguida, avança-se sete posições para a execução da coluna 06.

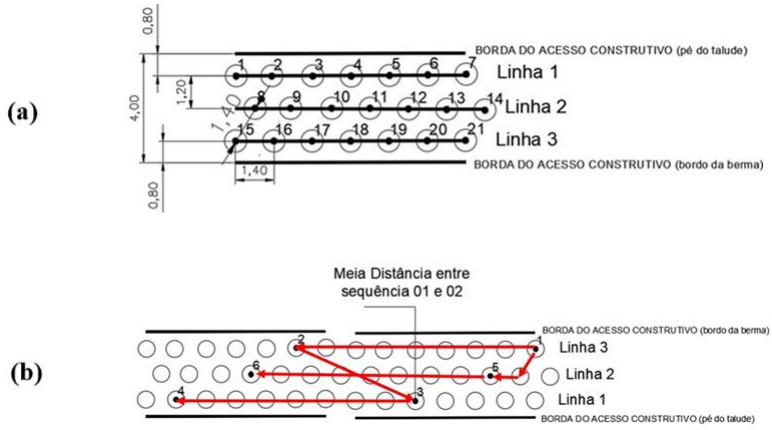


Figura 4. a) Layout geométrico de implantação das colunas; b) Sequenciamento de execução das colunas.

O refluxo é o material excedente, composto por calda de cimento, água e solo erodido, que retorna à superfície pelo espaço anular entre a haste de perfuração e as paredes do furo. Sua ocorrência é um importante indicativo da correta execução da injeção e da formação da coluna. Parte desse material deve ser coletada para a realização de ensaios laboratoriais. O volume excedente não coletado é direcionado por canaletas instaladas nas bermas até um canal localizado no pé da barragem, que o conduz aos tanques de decantação e fluidez por meio de canais de ligação (Figura 5b).

- Tanque de decantação: destinado à sedimentação das partículas sólidas presentes no refluxo, requerendo limpeza periódica.
- Tanque de fluidez: recebe o fluido sobrenadante proveniente do processo de decantação.

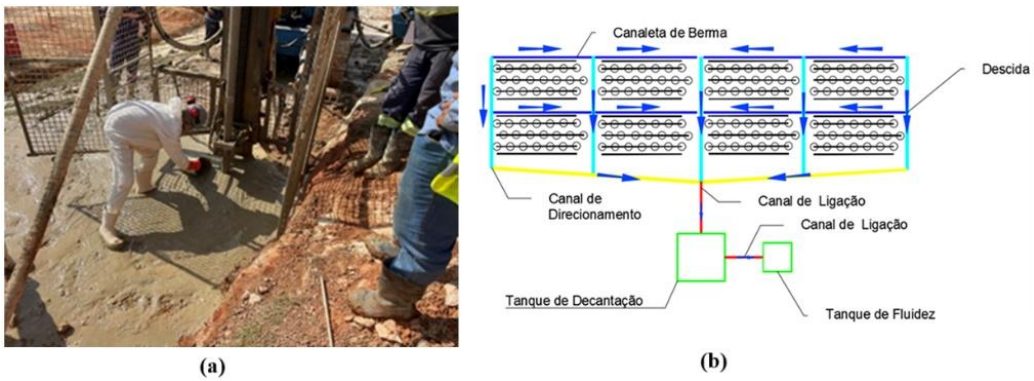


Figura 5. a) Refluxo; b) Diagrama para Direcionamento do Refluxo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES: CONTROLE DE QUALIDADE DE OBRA

Este tópico apresenta os procedimentos e resultados do controle de qualidade (QA/QC) da obra de *jet grouting*, estruturados em três eixos principais:

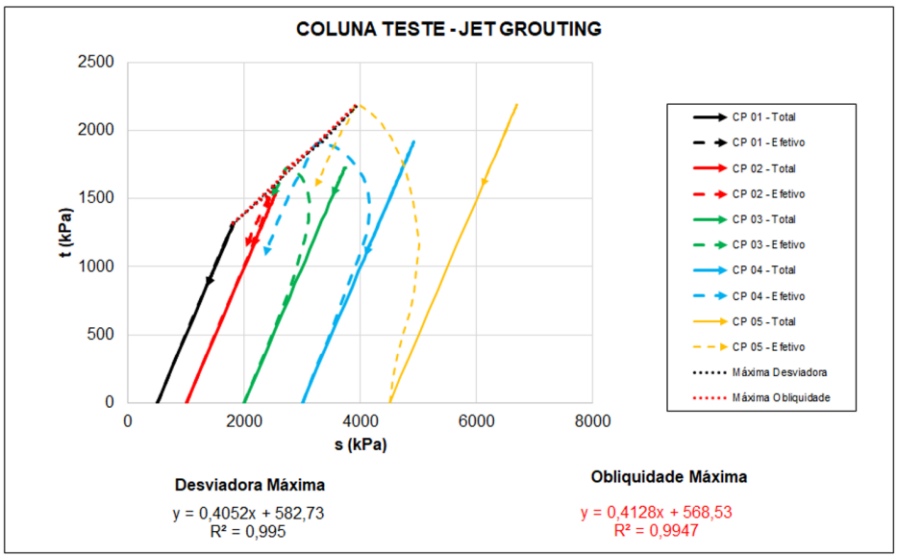
- Monitoramento da instrumentação durante a execução da obra;
- Controle por meio de laboratório de campo;
- Ensaios laboratoriais em colunas teste e colunas executadas in situ.

Durante toda a execução, foi realizado o monitoramento em tempo real dos instrumentos instalados no barramento, por meio de planilhas de controle específicas, garantindo o acompanhamento contínuo das condições da estrutura e a segurança operacional da obra.

Antes da execução das colunas definitivas, foram construídas três colunas teste para validação dos parâmetros de projeto. Conforme ilustrado na Figura 6, essa etapa permitiu verificar os diâmetros executados, avaliar o comportamento do material aluvionar tratado e coletar blocos indeformados para ensaios laboratoriais. Nas colunas teste foram realizados ensaios triaxiais UU (não adensado e não drenado) sob tensões confinantes de 500, 1000, 2000, 3000 e 4500 kPa. De acordo com Croce et al. (2014), esse ensaio é adequado para materiais tratados por *jet grouting*, possibilitando a supressão das etapas de saturação e adensamento em função do elevado ganho de resistência após o tratamento. Os resultados apresentados na Figura 7 indicaram parâmetros de resistência superiores à coesão mínima de projeto (300 kPa), confirmando a adequação dos parâmetros adotados e a efetividade da metodologia empregada.



Figura 6. Colunas Testes executadas antes do início do projeto.



Desviadora Máxima					
Tan α	**sinφ**	**Φ (°)**	**cos**	**a**	**c' (kPa)**
0,4052	0,41	24	0,91	582,73	637
Obliquidade Máxima					
Tan α	**sinφ**	**Φ (°)**	**cos**	**a**	**c' (kPa)**
0,4128	0,41	24	0,91	568,53	624

Figura 7. Ensaios nas Colunas Testes.

Para complementar o controle de qualidade, foi instalado um laboratório técnico próximo ao barramento, destinado à realização de ensaios de compressão uniaxial em amostras moldadas a partir do material de refluxo gerado durante a execução das colunas. A Figura 8 apresenta a infraestrutura empregada, incluindo a prensa automatizada responsável pela aquisição precisa dos registros de ruptura. Para cada coluna instrumentada

foram moldados corpos de prova rompidos aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade, sendo moldados sempre dois corpos de prova por idade (prova e contraprova). As amostras foram acondicionadas, a partir de 24 horas após a moldagem, em tanque de saturação, garantindo umidade constante e evitando ganhos de resistência por cura ao ar. Gráficos estatísticos (Figura 9) apresentam valores médios, desvios-padrão e limites máximos e mínimos das resistências obtidas. Todos os resultados superaram o valor mínimo especificado de 300 kPa, confirmando o desempenho adequado do tratamento.



Figura 8. Laboratório e Acondicionamento de Amostras.

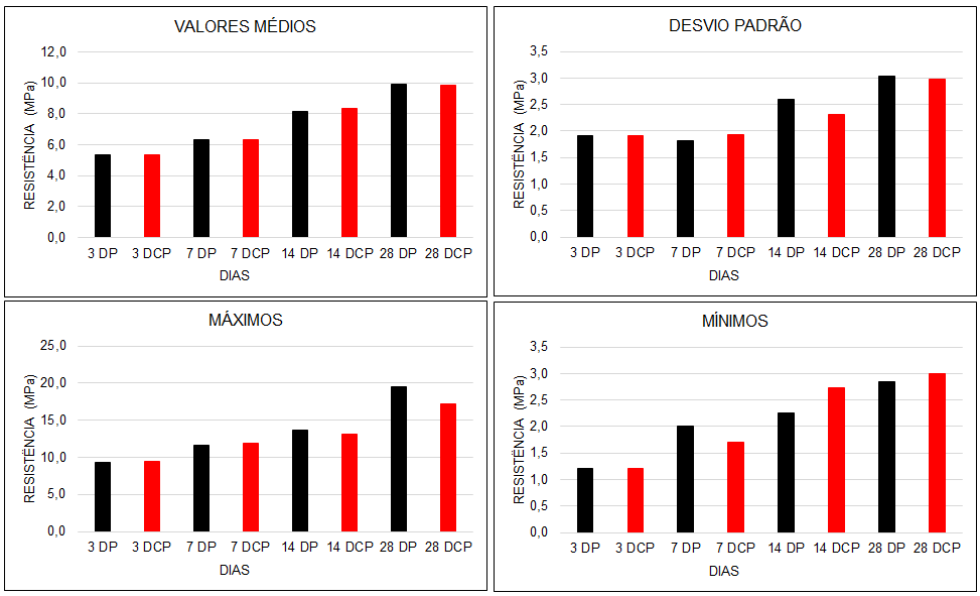


Figura 9. Gráficos de Barras – Resistência dos corpos de prova (prova e contraprova) ao longo de 3, 7, 14 e 28 dias.

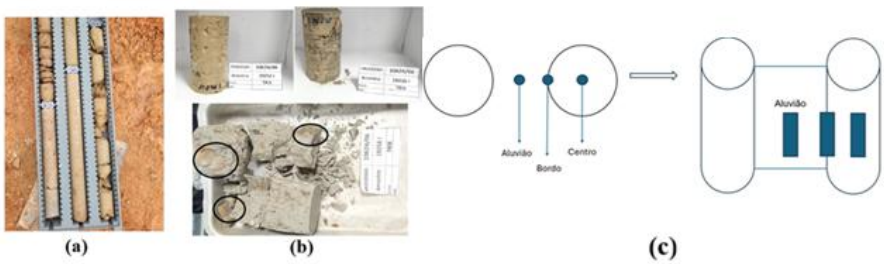


Figura 11. a) Colunas In Situ; b) Aspecto do corpo de prova antes e depois da ruptura; (c) Croqui da coleta de amostras no centro, bordo e externo a coluna.

Para avaliação do comportamento do material tratado em condições reais, foram coletadas amostras de colunas definitivas por meio de sondagens rotativas. A literatura (Croce *et al.*, 2014) destaca que solos argilosos tratados com jet grouting tendem a adquirir características de rochas brandas, fato confirmado durante a coleta, quando as amostras apresentaram fragmentação devido à vibração e à velocidade de perfuração. Após ajustes metodológicos, foi possível obter amostras representativas para ensaios triaxiais e de compressão uniaxial (Figura 11a) e a Figura 11b, apresenta CP antes e pós ruptura. Ressalta-se que, apesar da

presença de torrões e fragmentos típicos de solo-cimento, e das limitações dimensionais laboratoriais, os ensaios forneceram parâmetros confiáveis para validação do projeto. Dependendo da geometria da malha executada, pode subsistir material aluvionar remanescente entre colunas adjacentes. A Figura 11c apresenta o croqui de coleta adotado para investigação dessa condição. Como a malha triangular não promove sobreposição completa das colunas, verificou-se a presença de material natural entre pontos de interseção, exigindo avaliação específica para fins de confiabilidade.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta estruturada de Garantia da Qualidade (QA) e Controle da Qualidade (QC) aplicada à execução de obras de jet grouting para melhoria de fundações de barragens, tendo como base um estudo de caso desenvolvido em uma barragem de mineração no Brasil. A metodologia adotada integrou procedimentos de monitoramento instrumental, controle tecnológico em campo, ensaios laboratoriais e investigações geotécnicas in situ, permitindo a validação contínua das premissas de projeto e dos parâmetros executivos.

Os resultados obtidos nas colunas teste demonstraram que os parâmetros de resistência do material tratado superaram os valores mínimos estabelecidos em projeto, confirmando a adequação dos procedimentos executivos definidos para a obra. De forma complementar, os ensaios de compressão simples realizados em amostras de refluxo evidenciaram comportamento consistente de ganho de resistência ao longo do tempo de cura, sem ocorrência de resultados inferiores aos critérios de aceitação estabelecidos.

As investigações realizadas nas colunas definitivas permitiram confirmar a manutenção das propriedades geotécnicas observadas durante a fase de testes, fornecendo evidências da efetividade do tratamento e da confiabilidade dos parâmetros utilizados nas análises de estabilidade da barragem. Além disso, o monitoramento contínuo da instrumentação demonstrou que a execução do jet grouting não produziu alterações significativas no comportamento da estrutura, garantindo condições adequadas de segurança durante todas as etapas construtivas.

Os resultados obtidos evidenciam que a implementação de um sistema robusto de QA/QC é fundamental para reduzir incertezas associadas à execução do jet grouting, aumentar a rastreabilidade das atividades executadas e fornecer subsídios técnicos para tomada de decisão em obras geotécnicas de elevada criticidade. Finalmente, o estudo contribui para a consolidação de diretrizes práticas de QA/QC aplicáveis à realidade brasileira, suprindo parcialmente a carência de referências nacionais sobre o tema e fornecendo subsídios para futuros empreendimentos que empreguem essa tecnologia em fundações de barragens.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Deus, e aos familiares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Croce, P.; Flora, A.; Modoni, G. (2014), *Jet Grouting: Technology, Design and Control*, 1st Edition, CRC Press, Boca Raton.

Gilbert, R.B; Najjar, S.S.; Dellinger, G.; Allen, J.M (2018), *The Probabilistic Aspects of QA-QC for Geotechnical Applications*, Geotechnical Safety and Reliability GSP 286.

Li, D.Q., Tang, W.H. and Zhang, L.M. (2008), "*Updating Occurrence Probability and Size of Defect for Bored Poles,*" Structural Safety, 30(2), 130-143.

Tang, W. H. (1973), "*Probabilistic Updating of Flaw Information," Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 1, No. 6, 459-467.

Tang, W. H. (1993), "*Recent Developments in Geotechnical Reliability,*" Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, University College, University of South Wales, Canberra, Australia, pp. 1-26.

Zhang, L.M. , Li, D.Q. and Tang, W.H. (2006), "*Impact of Routine Quality Assurance on Reliability of Bored Piles*," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(5), 622-630.