

Descaracterização de “Barragens de Rejeito à Montante” com Uso do Jet Grouting: Um Caso Inédito no Brasil

Alfredo Dácio de Moraes Filho

Engenheiro Civil, Novatecna S/A, São Paulo, Brasil, alfredomoraes@novatecna.com.br

Akira Koshima

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

Miriano Rolando Pieroni

Diretor Presidente, Novatecna S/A, São Paulo, Brasil, pieroni@novatecna.com.br

Victor Moraes de Lima

Engenheiro Civil, Novatecna S/A, São Paulo, Brasil, victorlima@novatecna.com.br

RESUMO: No contexto contemporâneo, onde incidentes envolvendo barragens de rejeito repercutiram no cenário nacional brasileiro, medidas regulatórias foram instauradas com o intuito de mitigar riscos e preservar a integridade tanto ambiental quanto humana. Essas medidas delineiam diretrizes para a descaracterização segura das barragens já existentes e concentram-se na minimização de riscos associados a tais estruturas. Nesta conjuntura, a utilização da tecnologia Jet Grouting emergiu como solução importante em um destacado projeto de descaracterização de barragem de rejeito alteado a montante. A meta central desta aplicação convergiu para a substancial melhoria das propriedades geotécnicas dos depósitos de rejeito remanescentes, situados à jusante da barragem a ser descaracterizada, nas fundações dos aterros de reforço e drenagem a executar. Este artigo pretende delinear as principais razões que motivaram a seleção desta tecnologia, bem como apresentar precauções preliminares indispensáveis à fase de execução do jet grouting e relatar sobre a prática de monitoramento contínuo da qualidade dos serviços realizados. Os desfechos advindos da aplicação da referida tecnologia são discutidos, sublinhando os benefícios apreciáveis alcançados no que concerne à estabilidade estrutural, resistência ao cisalhamento e deformação, refletindo, conseqüentemente, na segurança global da barragem de rejeito à montante.

PALAVRAS-CHAVE: Jet Grouting, Descaracterização de Barragem, Barragens de Rejeito, Estabilidade Geotécnica, Segurança de Barragens, Melhoria de Solo.

ABSTRACT: In the contemporary context, where incidents involving tailings dams have resonated in the Brazilian national scenario, regulatory measures have been established with the intent to mitigate risks and preserve both environmental and human integrity. These measures outline guidelines for the safe decommissioning of existing dams and focus on minimizing risks associated with such structures. In this situation, the use of Jet Grouting technology emerged as an important solution in a notable project for the decommissioning of a tailings dam raised by upstream method. The central goal of this application was aimed at substantially improving the geotechnical properties of the remaining tailings deposits located downstream of the dam to be decommissioned, in the foundations of the reinforcement and drainage embankments to be constructed. This article intends to outline the main reasons that motivated the selection of this technology, as well as to present essential preliminary precautions for the execution phase of jet grouting and to report on the practice of continuous monitoring of the quality of the services performed. The outcomes derived from the application of said technology are discussed, highlighting the appreciable benefits achieved in terms of structural stability, shear strength, and deformation, consequently reflecting on the overall safety of the upstream tailings dam.

KEYWORDS: Jet Grouting, Dam Decommissioning, Tailings Dams, Geotechnical Stability, Dam Safety, Soil Improvement.

1 INTRODUÇÃO

Em um contexto marcado por exigências crescentes por segurança e inovação nas práticas de gestão de barragens de rejeitos, o projeto de descaracterização de uma distinta barragem localizada entre os municípios de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais, Brasil, emerge como um referencial de inovação e compromisso técnico. Frente aos desafios de estabilidade e integridade de uma barragem de rejeito inativa, o projeto adotou a tecnologia de Jet Grouting, um movimento estratégico visando atender às demandas regulatórias rigorosas e às necessidades técnicas específicas do contexto.

Centrando esforços na reestruturação da camada de rejeitos, o objetivo foi mitigar riscos e assegurar a estabilidade de longo prazo da área. O Jet Grouting, selecionado após uma análise comparativa das opções disponíveis, destacou-se pela sua capacidade de consolidar a massa de rejeitos, aumentando sua resistência ao cisalhamento e diminuindo a susceptibilidade a movimentações indesejadas, com um controle preciso sobre o processo. Este procedimento assegurou a intervenção com eficiência e precisão, destacando-se como uma escolha pragmática diante dos desafios encontrados.

Este trabalho examina o uso do Jet Grouting em rejeitos. Analisa-se a escolha dessa tecnologia, medidas de precaução para sua implementação e o papel vital do monitoramento para garantir a eficácia e qualidade ao projeto.

2 A ESCOLHA DO JET GROUTING

A tecnologia do Jet Grouting, desenvolvida inicialmente no Japão durante a década de 1970, representa um avanço significativo nas técnicas de melhoramento do solo. Este método é notável por sua capacidade de transformar e estabilizar solos “in situ”, utilizando um jato de alta pressão para desagregar o solo e misturá-lo com uma suspensão de cimento (Figura 1.). O processo resulta na formação de corpos sólidos, geralmente cilíndricos, que melhoram as propriedades mecânicas e de permeabilidade do solo original. A principal vantagem do Jet Grouting reside na sua flexibilidade e precisão, permitindo a formação de colunas de reforço nas regiões estritamente necessárias, com pouca ou nenhuma perturbação às estruturas adjacentes ou ao ambiente.

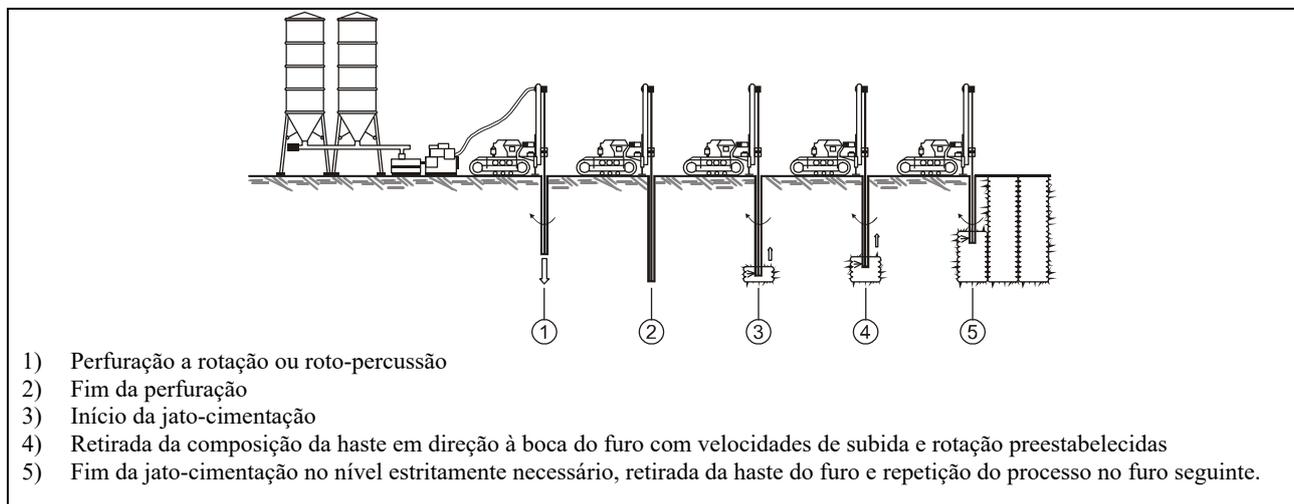


Figura 1. Sequência construtiva do Jet Grouting (KOSHIMA, 2019).

Uma das características técnicas mais notáveis do Jet Grouting reside na sua capacidade de efetuar perfurações de diâmetro relativamente reduzido, geralmente situando-se entre 100 a 150 milímetros (aproximadamente 4 a 6 polegadas), e, a partir dessas, desenvolver colunas de solo-cimento de grande diâmetro. Este atributo se mostra particularmente benéfico em empreendimentos que demandam intervenções profundas e substanciais no subsolo, sobretudo em situações onde métodos convencionais de melhoramento do solo podem enfrentar limitações de viabilidade ou eficácia. A habilidade de gerar colunas de ampla dimensão a partir de perfurações diminutas confere uma abordagem notavelmente flexível e custo-efetiva para

a estabilização de solos, representando uma solução altamente eficiente para uma vasta gama de desafios geotécnicos.

Especificamente, o Jet Grouting se destaca pela sua aplicabilidade na consolidação de formações rochosas, onde outras técnicas poderiam ser menos eficazes ou mesmo inviáveis (KOSHIMA et al., 2022). A capacidade do Jet Grouting de penetrar e estabilizar blocos rochosos é especialmente vantajosa, pois permite o reforço e a integração dessas estruturas geológicas complexas no projeto de melhoria do terreno. Esta técnica, portanto, não apenas facilita a estabilização de solos, mas também permite a execução efetiva de colunas em substratos rochosos, ampliando significativamente o espectro de aplicabilidade do Jet Grouting em projetos de engenharia civil e geotécnica.

3 DESIGN DO REFORÇO DE FUNDAÇÃO POR MEIO DO JET GROUTING

O design de reforço de fundação via Jet Grouting foi orientado pela sua eficácia na estabilização in situ de solos, desenvolvendo modelos de estabilidade que atendessem aos requisitos específicos do projeto, incluindo a segurança na escavação de sedimentos moles, adequação de fatores de segurança, e minimização de assentamentos e deslocamentos. Incorporou-se ao design barretes paralelos ao longo do vale para suporte e resistência ao cisalhamento, com colunas secantes de 0,9 m (expandidas para 1,2 m nos primeiros 3,0 m) espaçadas a cada 2,0 m. Colunas primárias e secundárias, estas últimas de 1,2 m de diâmetro formando uma capa de 3,0 m de espessura (Figura 2.), reforçaram as fundações e proporcionaram uma base para as camadas de transição e drenagem, otimizando a distribuição de tensões.

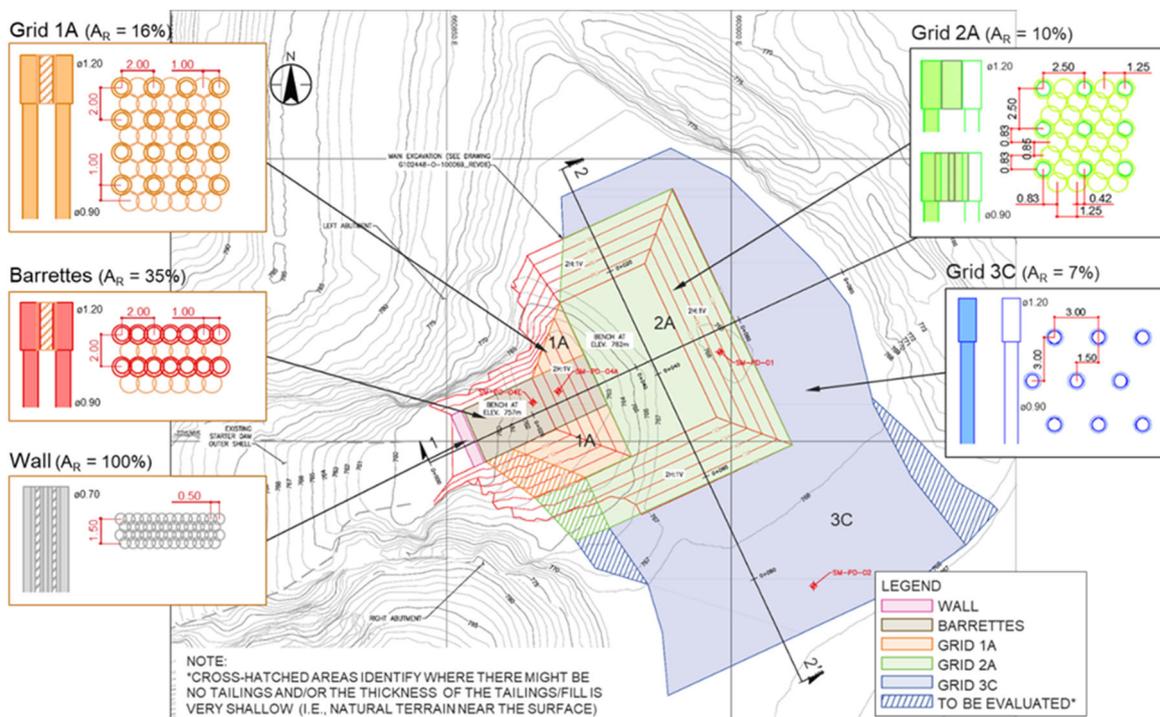


Figura 2. Elementos da solução em Jet Grouting (PINHEIRO et al., 2023).

A disposição e configuração das colunas primárias e secundárias, organizadas em diferentes malhas — especificamente, Grid 1A, Grid 2A e Grid 3C - com variações nos espaçamentos.

4 VALIDAÇÃO INICIAL DOS CRITÉRIOS DE QUALIDADE

Após a escolha do Jet Grouting, amplamente reconhecido por sua eficiência na estabilização in situ de solos, emergiram incertezas relacionadas às premissas de projeto, particularmente quanto à geometria e resistência dos elementos de Jet Grouting, além de preocupações sobre os efeitos adversos na barragem durante as injeções, especialmente em relação às vibrações.

Essas questões destacaram a necessidade de realizar testes piloto, que se mostraram fundamentais por dois motivos principais: em primeiro lugar, para validar a eficácia da técnica de Jet Grouting na melhoria dos rejeitos remanescentes na base do sistema de drenagem passiva e do aterro de reforço; e em segundo, para determinar e afinar os parâmetros de controle operacional (Tabela 1.). A precisão nesses ajustes era vital para garantir a conformidade com os critérios de aceitação e os parâmetros de projeto, contribuindo assim para o êxito e a segurança do projeto.

Tabela 1. Critérios de qualidade iniciais.

Tipo	Critério Alvo
Vibração	Velocidades de propagação das ondas abaixo de 25 mm/s.
Geometria.	Diâmetros das colunas definidos em 0,9 e 1,2 metros; continuidade assegurada dos barretes; adequado engaste das colunas no saprolito e na rocha base.
Resistência.	Resistência à compressão não confinada mínima de 1,5 MPa após 28 dias de cura.
Qualidade e homogeneidade.	Uniformidade estrutural com uma recuperação de núcleo mínima de 85%.

4.1 Descrição dos critérios iniciais de qualidade

4.1.1 Vibração

Durante a validação dos critérios iniciais de qualidade, foi dada atenção especial às vibrações geradas pelo processo de Jet Grouting em rejeitos com alto risco de liquefação, realizando-se ensaios geofísicos por meio de acelerômetros. Esses ensaios objetivaram monitorar a velocidade de propagação das ondas vibratórias, com o critério estabelecido de que essa velocidade não deveria exceder 25mm/s. Esta precaução buscava garantir que as vibrações não provocassem alterações nas propriedades geotécnicas dos rejeitos, preservando a estabilidade e a segurança da estrutura.

A implementação desse critério nos estágios iniciais do projeto foi fundamental, assegurando que as operações de Jet Grouting não afetassem adversamente a integridade dos rejeitos. Tal medida preventiva demonstrou a importância de avaliações criteriosas das condições geotécnicas em projetos que envolvem técnicas avançadas de melhoria do solo, contribuindo para o sucesso do projeto ao manter os padrões de segurança e desempenho requeridos.

4.1.2 Geometria

A verificação da geometria das colunas foi um passo fundamental na fase inicial do projeto, enfocando especialmente na área denominada como barrete (figura 3.). Essa análise inicial visou garantir a correta formação e aderência entre as colunas aspectos críticos para a estabilidade estrutural do sistema de Jet Grouting. A precisão na conformação das colunas e a eficácia da sua interligação, sobretudo nas áreas de barrete, eram essenciais para assegurar um suporte contínuo e integrado, otimizando assim a resistência e a capacidade de carga do solo reforçado.

Adicionalmente, a atenção voltou-se para a interação das colunas com o filito e saprolito oriundo desse em camadas imediatamente superiores. As verificações iniciais buscaram confirmar uma aderência eficiente entre as colunas de Jet Grouting e essas camadas geológicas, uma vez que tal aderência é fundamental para a distribuição uniforme das tensões e a transferência adequada de cargas no subsolo. Estas avaliações, realizadas nas etapas iniciais, foram determinantes para validar a eficácia da tecnologia de Jet Grouting empregada, destacando a importância de um planejamento preciso e da execução cuidadosa no sucesso do projeto e na melhoria das condições geotécnicas do local.



Figura 3 – Verificação das colunas teste.

4.1.3 Resistência

A realização de sondagens foi essencial para obter testemunhos indeformados, visando verificar a qualidade e a resistência das colunas de Jet Grout (Figura 4.). Esses testemunhos foram avaliados com base em critérios de aceitação específicos, focando principalmente na resistência uniaxial não-confinada, que deveria alcançar, no mínimo, 1,5 MPa após 28 dias de cura. A meta era que pelo menos 90% das amostras cumprissem esse padrão de resistência.

A frequência e os critérios para a realização dos ensaios de compressão axial não-confinada foram estabelecidos com base no comprimento das colunas. Foram determinados dois ensaios para colunas de mais de 10 metros de comprimento e um ensaio para colunas mais curtas. Essa abordagem tinha o objetivo de realizar uma análise precisa da resistência e qualidade das colunas formadas, contribuindo para a avaliação compreensiva da estrutura.



Figura 4. Aspecto dos corpos de prova das amostras indeformadas após rompimento.

4.1.4 Qualidade e homogeneidade

Para avaliar a qualidade e homogeneidade das colunas de Jet Grouting, corpos de prova foram extraídos das colunas por meio de sondagem rotativa, utilizando um barrilete amostrador tipo PQ com diâmetro interno de 63 mm. Esse procedimento permitiu um avanço hidráulico controlado, com mínima utilização de água e sem induzir vibrações, minimizando potenciais danos aos testemunhos.

As sondagens para extração dos corpos de prova foram programadas para ocorrer no mínimo 14 dias após a injeção da calda de cimento, assegurando que os testemunhos representassem adequadamente a condição curada das colunas. Além disso, estabeleceu-se a necessidade de uma recuperação mínima de 85% do núcleo durante a extração dos testemunhos, um critério essencial para garantir que a avaliação da qualidade e homogeneidade das colunas fosse realizada com a maior precisão possível, refletindo o verdadeiro estado e integridade das estruturas de Jet Grouting.

5 CONTROLE DE QUALIDADE DURANTE A EXECUÇÃO

Anteriormente a fase de franca operação, foi realizada uma revisão detalhada dos planos de engenharia e especificações técnicas, preparando todos os equipamentos essenciais, como a máquina perfuratriz (Figura 5.), o sistema de injeção, e o conjunto de moto-bomba e misturador-agitador. Ferramentas avançadas de medição, como inclinômetros e dataloggers, foram cruciais para o controle das operações.



Figura 5. Execução do Jet Grouting com 3 equipamentos em escavações escalonadas.

5.1 Descrição dos controles de qualidade durante a operação

A aplicação da técnica de Jet Grouting seguiu um processo rigoroso, desde a perfuração até a injeção da mistura de cimento, respeitando a sequência de execução estabelecida. Um sistema de controle de qualidade foi implementado para monitorar cada etapa, garantindo a exatidão na localização, profundidade e verticalidade das colunas, além da verificação constante da pressão de injeção.

5.1.1 Monitoramento

Para otimizar a execução e garantir a precisão do projeto, foram utilizados dataloggers de última geração (Figura 6.). Esses dispositivos registravam em tempo real parâmetros críticos, como pressão de injeção, taxa de fluxo e inclinação das colunas, fornecendo dados detalhados que permitiram ajustes imediatos e precisos. Essa abordagem assegurou a conformidade com os padrões de qualidade e a eficácia contínua das operações de Jet Grouting.

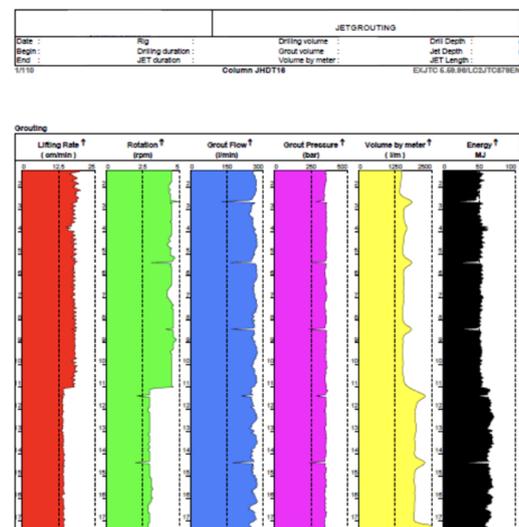


Figura 6. Dataloggers e relatórios similares foram utilizados para controle (JEAN LUTZ S.A., 2024)

5.1.2 Verticalidade

As medições de verticalidade nas perfurações utilizaram instrumentos de perfilagem avançados, entre eles, um giroscópio de busca do Norte. Especificamente adaptados para uso nas hastes Jet Grouting, estes dispositivos foram capazes de registrar pontos a cada centímetro com alta precisão. Essa tecnologia permitiu uma avaliação exata da orientação e inclinação logo após a conclusão das perfurações, assegurando que as operações satisfizessem os elevados padrões de precisão e qualidade demandados.

5.1.3 Controle Tecnológico

Durante a execução do projeto, além da sistematização dos controles efetuados na etapa de testes, a avaliação da calda de cimento foi rigorosamente adotada, envolvendo a medição de exsudação, densidade e viscosidade após a utilização de cada 180 toneladas de cimento, que representava a capacidade total dos silos no canteiro de obras.

Adicional a esses controles, o material de refluxo foi coletado e acondicionado em formas cilíndricas com dimensões superiores às padrões recomendadas - especificamente, com 100 mm de diâmetro interno e 200 mm de altura. Esta abordagem foi escolhida para lidar com a consistência pastosa e a heterogeneidade do material inerte, composto por solo desagregado contendo torrões.

5.1.4 Controle experimental

A análise do refluxo de Jet Grouting, composto por solo-cimento, é ferramenta crucial para avaliar a qualidade do serviço e estimar o diâmetro das colunas formadas, segundo Lesnik (2003) através da formulação de balanço de massa. Este procedimento, muito embora mantenha dúvidas quanto a validação da fórmula e não substituisse verificações diretas, forneceu importantes diretrizes aos executores durante a aplicação da técnica conferindo camada extra de qualidade. Dessa forma, ao passo da execução, obteve-se aplicado a formulação de balanço de massa as seguintes medianas (Tabela 2.):

Tabela 2. Valores obtidos na formulação de balanço de massa segundo Lesnik (2003).

Diâmetro projetado	Calda (kg/m ³)	Refluxo (kg/m ³)	Diâmetro med. (m)
Em colunas ø70cm	1.610	1.800	0,95
Em colunas ø90cm	1.592	1.808	1,05
Em colunas ø120cm	1.616	1.791	1,33

6 DATABOOK – UM COMPÊNDIO DETALHADO DO DESEMPENHO DO PROJETO

O databook de encerramento, elaborado ao final do projeto, constitui um compêndio detalhado que documentou todas as fases do trabalho, desde a concepção até sua conclusão. Esse dossiê incluiu desenhos técnicos, especificações do método de Jet Grouting, registros de construção, atividades de monitoramento e certificações de qualidade dos materiais e eficácia das colunas Jet Grouting.

Enriquecido com relatórios finais, o databook não só resumiu o desempenho do projeto, mas também registrou lições aprendidas, oferecendo insights valiosos para projetos futuros (Tabela 3.).

Este arquivo abrangente validou a execução do projeto em conformidade com os padrões contratuais e regulatórios, servindo como garantia da segurança e confiabilidade da obra.

Tabela 3. Valores estatísticos obtidos na conclusão do projeto registrados no Databook.

Descrição	Valor Alvo	Valor Obtido
Densidade da calda de cimento (a/c = 0,8).	1.620,00 kg/m ³	1.623,33 (± 15,28) kg/m ³
Resistência da calda de cimento aos 28 dias (a/c = 0,8).	-	11,74 (± 1,29) MPa
Densidade do material de refluxo.	-	1.882,50 (± 45,00) kg/m ³
Resistência em amostras obtidas do material de refluxo.	≥1,50 MPa	8,16 (± 1,71) MPa
Resistência em amostras indeformadas.	≥1,50 MPa	8,41 (± 3,54) MPa
Exudação da calda de cimento (a/c = 0,8).	-	2,83 (± 0,32) %
Fluidez da calda de cimento (a/c = 0,8).	-	7,2 (± 0,3) seg.
Fluidez do material de refluxo.	-	9,1 (± 0,7) seg.
Taxa de cimento por metro cúbico de coluna.	1.097,50 kg/m ³	1.134,71 (± 20,81) kg/m ³
Tolerância na verticalidade das perfurações (L ≥ 5,0 m).	≤1,00%	0,21 (± 0,43) %

7 CONCLUSÕES

A implementação do Jet Grouting neste projeto destacou sua eficácia na estabilização de solos, melhorando significativamente as propriedades geotécnicas dos rejeitos remanescentes. Selecionada por sua adaptabilidade e precisão, esta técnica permitiu enfrentar os desafios de estabilidade e integridade de uma barragem de rejeito inativa, cumprindo rigorosamente as demandas regulatórias e técnicas. Os resultados obtidos reafirmaram a capacidade do Jet Grouting em criar colunas de reforço em rejeitos eficazmente, evidenciando sua contribuição para a segurança estrutural, resistência ao cisalhamento e minimização de movimentações indesejadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que foram essenciais para o êxito deste projeto, desde o Proprietário do Empreendimento, pelo suporte constante, até o Projetista, o Acompanhamento Técnico e a Fiscalização, por garantirem precisão, inovação e conformidade. Um reconhecimento especial à Empreiteira e sua equipe, cujo empenho e proatividade foram cruciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Koshima, A. (2019). *Livro Fundações: Teoria e Prática, Jet Grouting*, sub-item 17.2, cap. 17, p 692 a 706, Oficina de Textos - ABMS ABEF, com vários editores e autores, 3ª edição.
- Koshima, A. et al. (2022) *Jet Grouting na Consolidação de Maciços com Blocos*, XX COBRAMSEG, Campinas, Brasil.
- Pinheiro, M. et al. (2023). *Programa de teste de campo de Jet Grouting em rejeitos moles, Proceedings of Tailings and Mine Waste, Vancouver, Canada*.
- Jean Lutz S.A. Devices. Disponível em: <<http://www.jeanlutzsa.fr/en/devices/>>. Acesso em: 01 jul. 2024.
- Lesnik, M. (2003). Tese de Doutorado, *Determinação do alcance do processo de jateamento, levando em consideração os parâmetros de fabricação e as propriedades do solo por meio de análise de retorno*, Graz University of Technology, Graz, Áustria.