DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/21

Avaliação de Soluções para Tratamento de Fundação em Barragens: Comparação entre Jet Grouting e Remoção/Substituição de Solos Moles

Katia Botelho Torres Galindo de Souza
Engenheira Geotecnica, TPF Engenharia, Recife-PE, Brasil, katia.galindo@tpfe.com.br

Vanessa de Souza Batista
Engenheira Geotecnica, TPF Engenharia, Natal-RN, Brasil, vanessa.batista@tpfe.com.br

Fernanda Yamaguchi Matarazo
Engenheira Geotecnica, TPF Engenharia, Nova Lima-MG, Brasil, fernanda.matarazo@tpfe.com.br

Luana Aparecida Silva
Engenheira Geotecnica, TPF Engenharia, Curvelo, Brasil, luana.aparecida@tpfe.com.br

Geovana Almeida
Engenheira, TPF Engenharia, Recife, Brasil, geovana.almeida@tpfe.com.br

RESUMO: O tratamento adequado da fundação é um dos fatores mais relevantes para garantir a segurança e o desempenho estrutural de barragens, especialmente em locais onde ocorrem solos de baixa resistência e elevada variabilidade geotécnica. Entre as soluções comumente empregadas destacam-se a escavação e substituição de solos fracos e as técnicas de melhoramento *in situ*, como o *jet grouting*. Cada alternativa apresenta vantagens e limitações relacionadas ao controle executivo, à capacidade de suporte, ao comportamento hidráulico e aos custos de implantação. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre essas duas soluções de tratamento de fundação, considerando aspectos geotécnicos, construtivos e de desempenho estrutural. A avaliação levou em conta fatores como espessura dos estratos compressíveis, condições hidrogeológicas, variabilidade do subsolo e restrições operacionais da área de implantação da barragem. Os resultados indicam que, em cenários caracterizados por solos moles localizados abaixo das estruturas, elevada heterogeneidade geotécnica e presença de fluxo subterrâneo, a substituição de solo pode apresentar limitações técnicas e econômicas significativas. Nesses casos, o *jet grouting* se mostra uma alternativa mais eficiente, pois permite o tratamento em profundidade, reduz a permeabilidade do maciço e aumenta a rigidez da fundação, contribuindo para o controle de recalques e para a melhoria da estabilidade global da estrutura. Conclui-se que a adoção do *jet grouting* proporciona maior confiabilidade ao tratamento da fundação, garantindo melhores condições de segurança geotécnica e desempenho hidráulico ao longo da vida útil da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de Fundação; Barragens; Jet Grouting; Solos Moles; Melhoramento de Solo; Segurança Geotécnica.

ABSTRACT: The proper treatment of foundations is one of the most relevant factors for ensuring the safety and structural performance of dams, especially in locations where low-strength soils and high geotechnical variability occur. Among the solutions commonly adopted are excavation and replacement of weak soils and *in situ* ground improvement techniques, such as jet grouting. Each alternative presents advantages and limitations related to construction control, bearing capacity, hydraulic behavior, and implementation costs.
This study presents a comparative analysis between these two foundation treatment solutions, considering geotechnical, construction, and structural performance aspects. The evaluation considered factors such as the thickness of compressible strata, hydrogeological conditions, subsurface variability, and operational constraints in the dam construction area. The results indicate that, in scenarios characterized by soft soils located beneath the structures, high geotechnical heterogeneity, and the presence of groundwater flow, soil replacement may present significant technical and economic limitations. In such cases, jet grouting proves to be a more efficient alternative, as it allows deep ground treatment, reduces the permeability of the soil mass,

and increases foundation stiffness, contributing to settlement control and improving the global stability of the structure. It is concluded that the adoption of jet grouting provides greater reliability in foundation treatment, ensuring improved geotechnical safety conditions and hydraulic performance throughout the service life of the dam.

KEYWORDS: Foundation Treatment; Dams; Jet Grouting; Soft Soils; Ground Improvement; Geotechnical Safety.

1 INTRODUÇÃO

A segurança e o desempenho estrutural de barragens estão diretamente relacionados às condições geotécnicas da fundação. A presença de solos de baixa resistência, elevada compressibilidade ou comportamento hidrogeológico complexo pode comprometer a estabilidade da estrutura, exigindo a adoção de técnicas adequadas de tratamento da fundação para garantir condições satisfatórias de suporte, controle de recalques e segurança ao longo da vida útil da barragem (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; ICOLD, 2013). Em estrutras de mineração, a escolha do método de melhoramento do solo deve considerar não apenas as propriedades geotécnicas dos materiais presentes no subsolo, mas também fatores construtivos, econômicos e operacionais associados à implantação da obra.

Entre as alternativas frequentemente utilizadas para o tratamento de fundações sobre solos de baixa competencia destacam-se a escavação e substituição do material inadequado e as técnicas de melhoramento in situ, como o *jet grouting*. A escavação e substituição consiste na remoção dos solos de baixa resistência e sua substituição por materiais compactados com propriedades geotécnicas controladas, permitindo maior previsibilidade do comportamento mecânico da fundação. Entretanto, quando os estratos compressíveis apresentam grande espessura ou estão associados a condições hidrogeológicas desfavoráveis, essa solução pode se tornar tecnicamente complexa e economicamente onerosa (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

Nesse contexto, o *jet grouting* tem sido amplamente empregado como técnica de melhoramento de solos em obras geotécnicas e de infraestrutura. O método consiste na injeção de calda de cimento sob alta pressão no interior do solo, promovendo a desagregação da estrutura natural do material e sua mistura com a calda cimentícia, formando colunas de solo-cimento com maior resistência, rigidez e menor permeabilidade (BRUCE; GALLAVRESI, 1981; CROCE; MODONI, 2007). Essa técnica apresenta vantagens importantes em cenários caracterizados por elevada variabilidade geotécnica, presença de solos moles intercalados com camadas mais rígidas ou necessidade de tratamento em maiores profundidades.

Além do aumento da resistência do maciço, o *jet grouting* contribui para a redução da permeabilidade da fundação e para o controle de recalques diferenciais, aspectos fundamentais para o desempenho hidráulico e estrutural de barragens (FANG; DANIELS, 2006). Dessa forma, a seleção da técnica de tratamento mais adequada deve resultar de uma avaliação integrada das condições geológicas, geotécnicas e operacionais da área de implantação da estrutura.

Diante desse contexto, este trabalho apresenta uma análise comparativa entre a solução de escavação e substituição de solos fracos e o tratamento por *jet grouting* aplicado à fundação de barragens implantadas sobre fundação contendo solo mole na região de Minas Gerais. A avaliação considera aspectos relacionados ao comportamento geotécnico, à viabilidade construtiva e ao desempenho estrutural da fundação, com o objetivo de identificar a alternativa que proporcione maior segurança, eficiência hidráulica e estabilidade global ao empreendimento.

2 METODOLOGIA

2.1 Parâmetros de resistência

Para a análise da barragem nos diferentes cenários, foram adotados os parâmetros de resistência apresentados no Quadro 1. Ressalta-se que os valores utilizados nas análises foram obtidos a partir de dados disponíveis na literatura técnica especializada e de estudos envolvendo materiais com características geológico-geotécnicas semelhantes às litologias presentes na área de estudo. Os parâmetros geotécnicos da

fundação e *jet grouting* foram adotados com base nos valores apresentados por Carvalho (2023) e Weaver & Bruce (2007), respectivamente e complementados por referências técnicas em empreendimentos similares.

No cenário de tratamento por *jet grouting*, considerou-se a melhoria das propriedades geomecânicas da fundação decorrente da execução de colunas de solo-cimento, obtidas pela injeção de calda cimentícia sob alta pressão. A calda é tipicamente composta por cimento, água e aditivos, podendo incluir bentonita e outros materiais, sendo injetada de forma a promover a mistura e o tratamento do solo in situ. Essa técnica proporciona aumento da resistência ao cisalhamento, incremento da rigidez e redução da permeabilidade dos materiais tratados, contribuindo para o aumento da estabilidade global da estrutura.

Quadro 1- Parametros de resitencia dos materais

Material	Cor	Peso específico (kN/m3)	coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Vertical Stress Ratio	Minimum Shear Strength (kPa)
Aterro argiloso		18	15	30		
Aterro		21	0	36		
Sedimento reservatório ND		15			0.2	10
Enrocamento		21	0	38		
Solo residual		20	12	27		
Saprolito		21	54	40		
Xisto		23	infinite Strength			
Jet grouting		20	450	30		
Sedimento argiloso mole ND		18	-	-	0.215	10

2.2 Análise de Estabilidade

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na avaliação comparativa do comportamento geotécnico da fundação de uma barragem submetida a duas alternativas de tratamento: (i) escavação e substituição de solos de baixa resistência e (ii) melhoramento do solo por meio da técnica de *jet grouting*. Para essa análise, foi realizada modelagem numérica de estabilidade de taludes utilizando o software Slide2, desenvolvido pela Rocscience, amplamente empregado em estudos de estabilidade em engenharia geotécnica.

As análises de estabilidade foram conduzidas de forma determinística, empregando os métodos de equilíbrio limite de Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973), considerando superfícies de ruptura circulares e não circulares otimizadas. Esses métodos permitem a determinação do fator de segurança a partir do equilíbrio de forças e momentos atuantes no maciço, considerando também as forças de interação entre as fatias durante o processo de cálculo, incluindo componentes normais e cisalhantes. Para a representação do comportamento resistente dos materiais, foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Foram consideradas análises em condições drenadas e não drenadas, de modo a contemplar diferentes cenários de saturação da fundação. Como referência normativa nacional, foram adotadas as diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR 13029/2024 e ABNT NBR 13028/2025, que apresentam recomendações para a realização de análises de estabilidade e para a adoção de valores mínimos de fator de segurança. Em especial, o item 3.5.9 da ABNT NBR 13029/2024 e o item 5.6.5.2 da ABNT NBR 13028/2025 tratam dos critérios de verificação da estabilidade geotécnica em estruturas dessa natureza.

Inicialmente, foi desenvolvido um modelo geotécnico representativo da seção transversal da fundação da barragem, com base nas informações obtidas a partir de investigações geológico-geotécnicas, incluindo sondagens, ensaios laboratoriais e interpretação estratigráfica do subsolo. O modelo considerou a caracterização dos diferentes horizontes de solo presentes na fundação, bem como a definição das condições geométricas da estrutura e das condições hidráulicas relevantes para as análises. Para a alternativa de melhoramento por *jet grouting*, o modelo incorporou a presença de colunas de solo-cimento formadas pela mistura do solo in situ com calda de cimento sob alta pressão. A representação do material tratado foi realizada

por meio da atribuição de parâmetros geotécnicos equivalentes, capazes de refletir o aumento da resistência e da rigidez do maciço, além da redução da permeabilidade da fundação decorrente do processo de melhoramento.

As análises de estabilidade serão executadas utilizando os métodos de equilíbrio limite disponíveis no software, permitindo a identificação das superfícies potenciais de ruptura e a determinação do fator de segurança global para cada cenário analisado. A comparação entre as duas alternativas de tratamento considerou, principalmente, os fatores de segurança obtidos, bem como a influência de cada técnica na melhoria das condições geotécnicas da fundação.

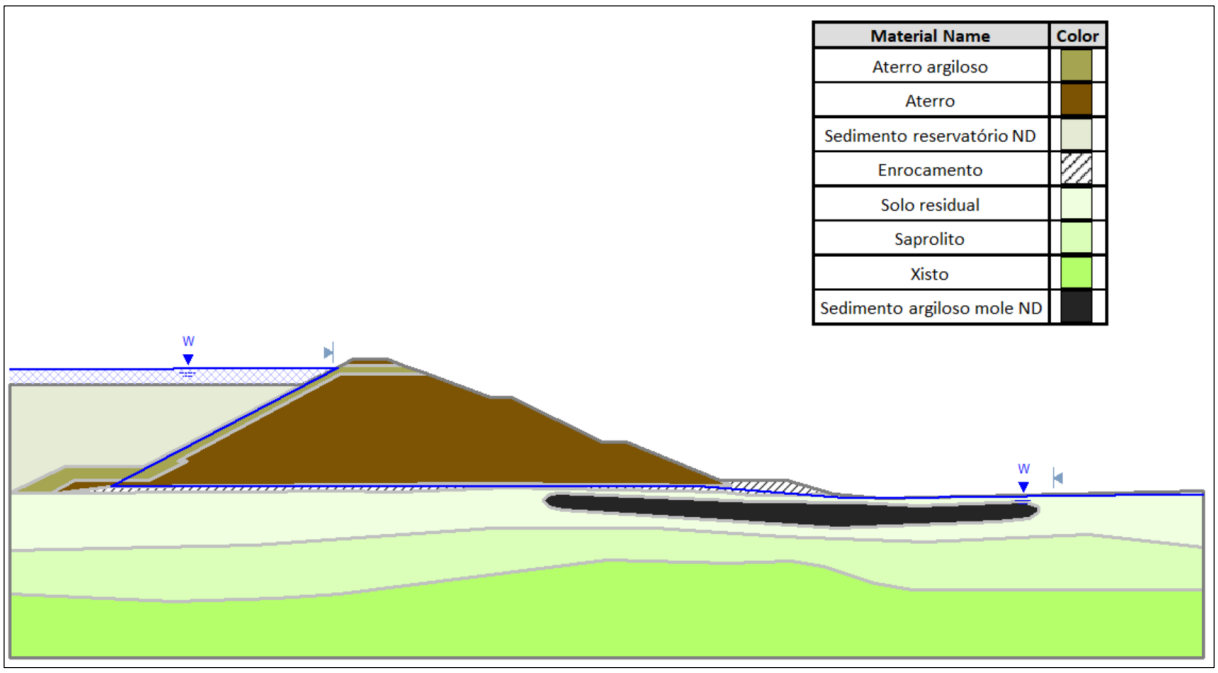
A partir da análise comparativa dos resultados, será possível avaliar o desempenho das soluções de tratamento de fundação, fornecendo subsídios técnicos para a seleção da alternativa mais adequada sob os aspectos de segurança estrutural, controle de deformações e viabilidade construtiva.

2.1.1 Seção de Análise

É apresentada a seção transversal representativa da barragem na Figura 1, adotada como base para a realização das análises de estabilidade da estrutura. As análises foram conduzidas a partrir do metodo de busca de Particle Swarm Search, que apresenta multiplas superficies críticas, a partir da cunha que apresenta menor fator de se gurança.

A partir dessa seção, serão avaliados os diferentes cenários propostos, considerando as condições de avaliações das soluções, sendo elas subsitiuição do solo mole por um material de mellhor competencia e a aplicação do Jet Grouting. As análises têm como objetivo verificar a estabilidade global da barragem, por meio da identificação das superfícies potenciais de ruptura e da determinação dos respectivos fatores de segurança, permitindo avaliar o desempenho geotécnico da estrutura nas condições analisadas.

Figura 1-Seção transversal da barragem analisada



3 RESULTADOS

A análise comparativa das alternativas de tratamento de fundação indicou que a solução baseada na escavação e substituição dos solos de baixa resistência apresenta limitações técnicas significativas para a área

em estudo. Verificou-se que a remoção integral dos materiais moles não é tecnicamente viável, em razão da ocorrência desses depósitos em profundidade e da inviabilidade construtiva associada a escavações extensas em condições de baixa estabilidade. Nessas circunstâncias, a execução de escavações profundas pode comprometer a segurança das obras durante a implantação, além de aumentar os riscos operacionais e geotécnicos.

Como consequência, parte dos materiais compressíveis permaneceria na fundação, mantendo zonas de menor rigidez e resistência sob a estrutura. Essa condição resulta em fatores de segurança inferiores aos desejáveis para estruturas de barragem, especialmente em cenários críticos de saturação e carregamento, além de favorecer a ocorrência de recalques diferenciais e deformações ao longo do tempo. Adicionalmente, a substituição parcial dos solos apresenta limitações quanto ao controle do fluxo percolante pela fundação, podendo aumentar a suscetibilidade a mecanismos de erosão interna e *piping*.

Por outro lado, a alternativa de tratamento por *jet grouting* apresentou desempenho superior nas análises realizadas. A técnica permite o tratamento em profundidade por meio da execução de colunas de solo-cimento, promovendo melhoria substancial das propriedades geomecânicas da fundação, com aumento da resistência ao cisalhamento, incremento da rigidez e redução da permeabilidade do maciço tratado.

Do ponto de vista da estabilidade global, os resultados demonstraram que o tratamento por *jet grouting* proporciona fatores de segurança compatíveis com os critérios normativos aplicáveis a estruturas de barragem, atendendo às premissas de projeto e segurança geotécnica. Além disso, a técnica contribui para: (i) o controle das deformações da fundação; (ii) a redução dos recalques diferenciais; (iii) o aumento da estabilidade global da estrutura; e (iv) o controle do fluxo percolante, reduzindo o potencial de desenvolvimento de mecanismos de piping.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o tratamento por jet grouting constitui a alternativa mais adequada para o empreendimento, apresentando maior robustez e confiabilidade no atendimento aos requisitos de estabilidade, segurança geotécnica e desempenho hidráulico da fundação ao longo da vida útil da barragem.

Figura 2 – Análise da condição inicial da barragem

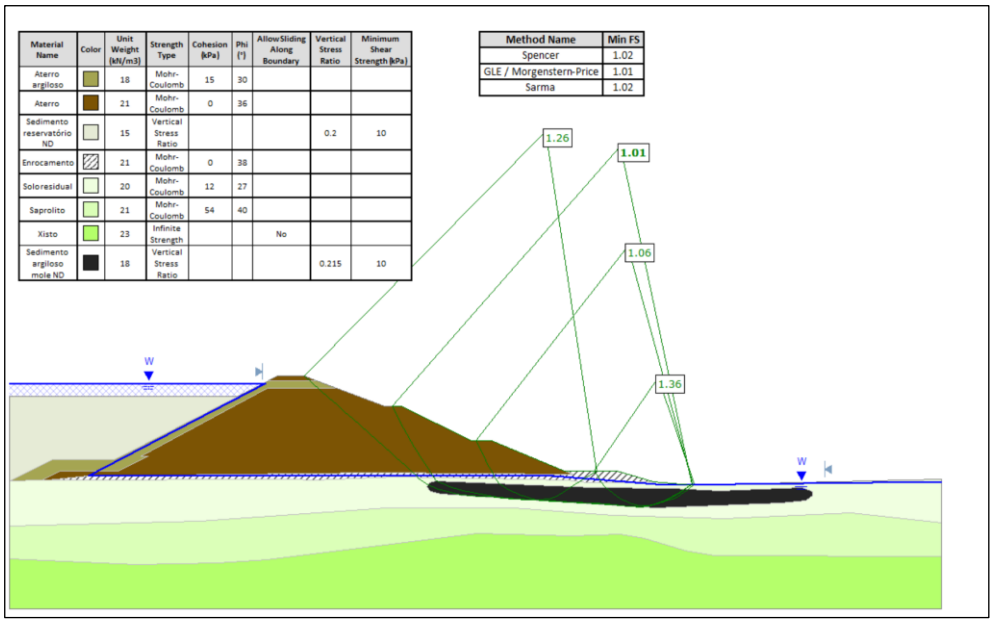


Figura 3 – Análise da substituição do material da baixa competência

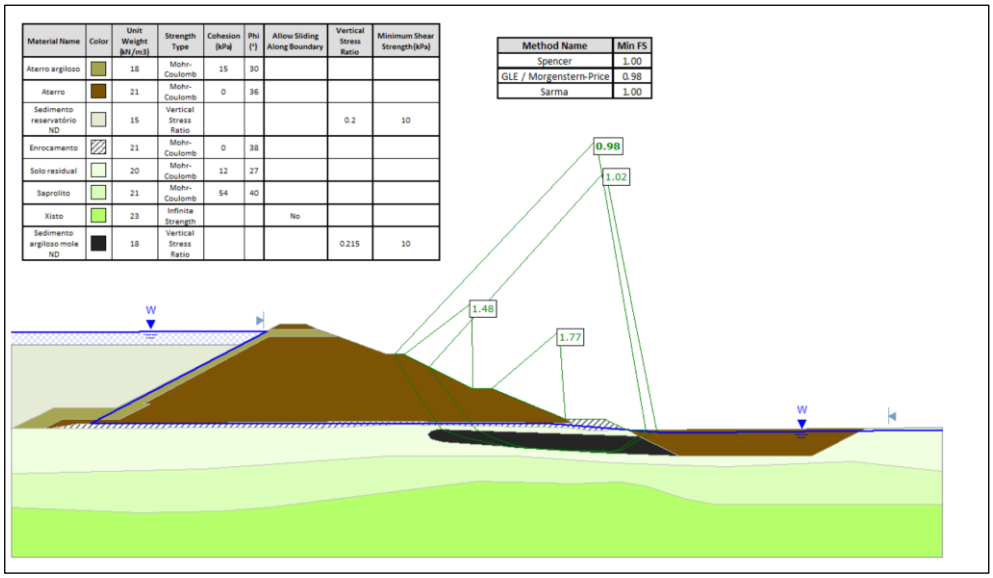
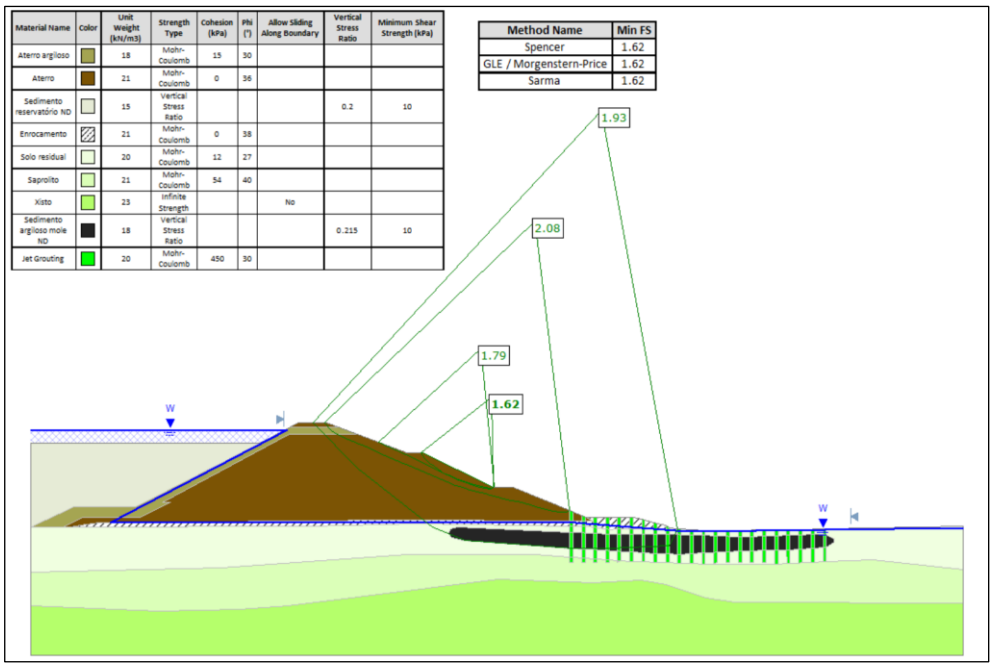


Figura 4 -Análise da aplicação de *Jet Grouting*



4 CONCLUSÕES

A partir da análise comparativa das alternativas de tratamento de fundação, verificou-se que a solução baseada na escavação e substituição de materiais moles não se mostra tecnicamente viável para o presente estudo de caso. Tal limitação decorre da impossibilidade de remoção integral dos materiais de baixa competência ao longo de toda a fundação. Ainda que a substituição seja viável em trechos localizados, os resultados indicam que, mesmo nessas condições, não são atendidos os fatores de segurança mínimos exigidos em norma. Dessa forma, parte dos solos de baixa resistência

permanece subjacente ao maciço da estrutura, resultando na manutenção de zonas com menor rigidez e resistência, o que compromete o desempenho geotécnico da fundação e a estabilidade global da estrutura.

Sob o ponto de vista da estabilidade, os resultados obtidos demonstram que a alternativa de tratamento por *jet grouting* apresenta desempenho significativamente superior, com fatores de segurança mais elevados e compatíveis com os critérios normativos aplicáveis a estruturas de barragem. Na análise realizada, o fator de segurança mínimo obtido foi de 1,62, valor superior ao limite mínimo exigido. Adicionalmente, a técnica de *jet grouting* mostrou-se particularmente adequada para o contexto geotécnico avaliado, caracterizado por elevada heterogeneidade dos materiais e presença de solos moles em profundidade, promovendo melhoria das propriedades mecânicas do maciço de fundação e maior confiabilidade no comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil.

AGRADECIMENTOS

À TPF Engenharia, pelo apoio financeiro e fornecimento de materiais, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUCE, D. A.; GALLAVRESI, F. The use of jet grouting in underground construction. Underground Space, v. 5, n. 3, p. 197-208, 1981.

CROCE, P.; MODONI, G. Design of jet grouting for geotechnical applications. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement, London, v. 11, p. 13-22, 2007.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. Soil strength and slope stability. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2014.

FANG, H. Y.; DANIELS, J. L. Introductory geotechnical engineering: an environmental perspective. London: Taylor & Francis, 2006.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Dam foundations and geotechnical engineering. Bulletin 164. Paris, 2013.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

CARVALHO, Gabriel Vidal de; SILVA, Guilherme de Almeida; MARTINS, Gustavo Rodrigues; SANTOS, Maycon Diego Souza; SOARES, Vitor Diniz. *Estabilidade de taludes por retroanálise: um estudo de caso no município de Nova Lima - Minas Gerais*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.