

Caso de obra de uma Estação de Bombeamento de Água Bruta na margem do Guaíba estabilizada com Jet Grouting

Cleber Floriano

Diretor, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, cleber@souzafloriano.com

Emily Quevedo

Acadêmica, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, emily@souzafloriano.com

Diego Pietrobon

Engenheiro, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, diego@souzafloriano.com

Patricia Souza

Diretora, SF Engenharia, Porto Alegre, Brasil, patricia@souzafloriano.com

RESUMO: Este artigo apresenta o uso da técnica de Jet Grouting para a construção de contenções na Estação de Bombeamento de Água Bruta (EBAB) da Ponta do Arado, em Porto Alegre (RS). Diante das condições geotécnicas e hidráulicas identificadas, foram necessárias soluções específicas para garantir a estabilidade e o controle do fluxo ascendente. Foram utilizadas colunas de Jet Grouting, com diâmetro médio de 1,2 m, dispostas em linhas com colunas secantes e formando tampão de fundo para combate à subpressão. Ensaios prévios de sondagem rotativa e compressão simples garantiram os parâmetros de resistência exigidos. O controle executivo incluiu monitoramento por instrumentação, com acompanhamento de deslocamentos e variações do nível d'água. Durante a execução, o sistema enfrentou três eventos de cheia, incluindo a cheia crítica de maio de 2024, sem instabilidades, comprovando a eficácia da solução. As análises de estabilidade basearam-se em conceitos de muros de gravidade e verificações de equilíbrio limite. Modelagens de fluxo mostraram redução significativa da permeabilidade. A eliminação de escoramentos pesados e tirantes otimizou o espaço de trabalho e minimizou patologias por infiltrações. A técnica demonstrou aplicabilidade favorável em obras em solos de baixa resistência e elevado nível freático.

PALAVRAS-CHAVE: Jet Grouting, estabilidade de escavações, melhoramento de solo, contenção.

ABSTRACT: This article presents the use of the Jet Grouting technique for the construction of retaining structures at the Raw Water Pumping Station (EBAB) of Ponta do Arado, in Porto Alegre (RS), Brazil. Implemented in a geologically unfavorable terrain with interbedded soft sandy and clayey soils and a shallow water table, the project required efficient solutions to ensure stability and control of upward hydraulic flow. Jet Grouting columns, with an average diameter of 1.2 m, were installed in secant column alignments, also forming a bottom plug to counteract uplift pressure. Preliminary rotary drilling and unconfined compression tests ensured compliance with required strength parameters. The construction process was monitored through instrumentation, tracking displacements and water level variations. During execution, the system withstood three flood events, including the critical flood of May 2024, without signs of instability, confirming the effectiveness of the solution. Stability analyses were based on gravity wall concepts and limit equilibrium verifications. Flow modeling showed a significant reduction in permeability. The elimination of heavy struts and tiebacks optimized workspace and reduced risks of infiltration-related pathologies. The technique proved highly advantageous for projects in low-strength soils and high groundwater conditions.

KEYWORDS: Jet Grouting, excavation stability, ground improvement, retaining structure.

1 INTRODUÇÃO

A implantação da Estação de Bombeamento de Água Bruta (EBAB) da Ponta do Arado, localizada em Porto Alegre/RS, conforme apresentado na Figura 1, demandou a escavação de um poço profundo em terreno geotécnica e hidraulicamente desfavorável, composto por solos moles de baixa resistência e presença de lençol freático superficial. Diante da necessidade de conter o solo, garantir a estanqueidade e prevenir fenômenos de subpressão e ruptura hidráulica durante a escavação, foi adotada a técnica de Jet Grouting como solução principal de contenção e impermeabilização.

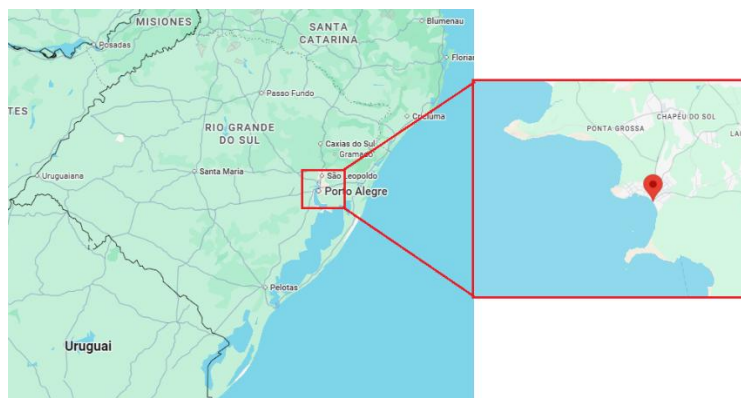


Figura 1. Local de estudo.

O Jet Grouting consiste em uma técnica de melhoramento do solo por injeção de calda de cimento sob pressão elevada, promovendo a desestruturação e mistura do solo *in situ*, formando colunas de solo-cimento de resistência de solos consistentes a rochas brandas e permeabilidade reduzidas significativamente em solos arenosos. Na EBAB Ponta do Arado, essas colunas foram projetadas para atuar simultaneamente como barreira lateral e tampão de fundo, permitindo a execução segura da escavação do poço sem necessidade de escoramentos internos, mesmo sob carga hidráulica atuantes.

Este artigo apresenta os principais aspectos da concepção, dimensionamento, execução e desempenho da solução em Jet Grouting aplicada na EBAB, evidenciando sua eficácia técnica em obras de infraestrutura submetidas a condições geotécnicas críticas.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO LOCAL

A área de implantação da Estação de Bombeamento de Água Bruta (EBAB) da Ponta do Arado encontra-se em uma planície aluvial da região sul de Porto Alegre/RS, caracterizada por solos inconsolidados, elevada umidade e lençol freático superficial. As investigações geotécnicas compreenderam ensaios SPT distribuídos na área de intervenção. A Figura 2 mostra uma seção geológica esquemática do local.

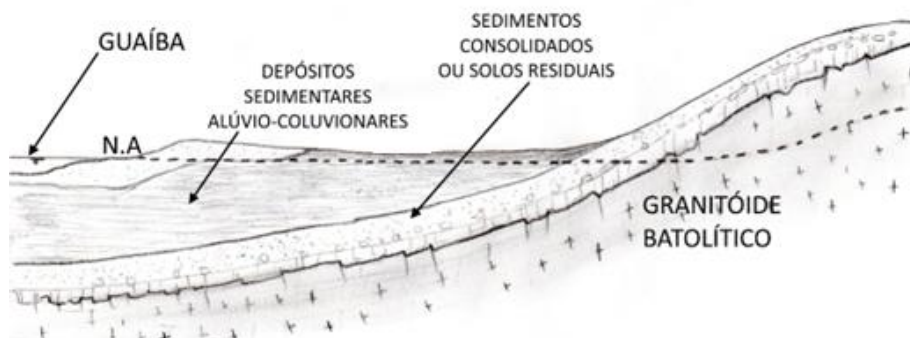


Figura 2: seção geológica esquemática da borda do Guaíba.

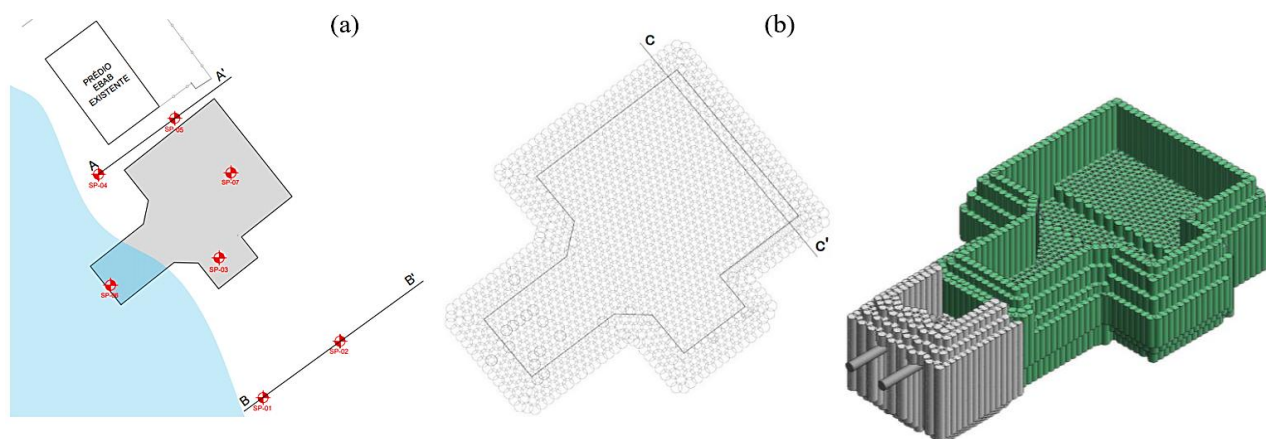


Figura 3: Localização das sondagens e projeção das colunas de jet grouting.

Os perfis identificaram a predominância de quatro principais unidades geotécnicas: aterros recentes, depósitos sedimentares moles, solos residuais maduros e solos residuais jovens. As camadas de solo mole apresentaram N-SPT variando entre 1 e 4, com espessuras significativas nos primeiros metros. O nível freático identificado é alto, em alguns pontos a 0,2 m da superfície, contribuindo para o risco de instabilidade hidráulica por subpressão.

Os parâmetros geotécnicos adotados para projeto indicaram valores de coesão efetiva de 3kPa nos depósitos sedimentares, 7kPa nos solos residuais maduros e 19 kPa nos solos residuais jovens, com ângulos de atrito efetivo entre 22° e 32°. Esse contexto geomecânico reforçou a necessidade de uma solução de contenção que oferecesse função estrutural, baixa permeabilidade e resistência à ruptura de fundo, atributos plenamente atendidos pela técnica de Jet Grouting. A parametrização pode ser vista em mais detalhes em Floriano e Cantarelli (2022).

3 CONCEITO E PRINCÍPIO DO JET GROUTING

O Jet Grouting é uma técnica de melhoramento de solo in situ que consiste na injeção de calda de cimento sob pressão através de bicos radiais instalados em haste rotativa, promovendo a desagregação e mistura do solo com o ligante, resultando na formação de colunas de solo-cimento com propriedades geotécnicas aprimoradas, conforme Figura 4. A aplicação adotada na EBAB Ponta do Arado combina jato de fluido e calda cimentícia, com pressão superior, permitindo a formação de colunas homogêneas, com diâmetro médio de 1,2 m.



Figura 4: Imagens da execução da coluna teste e do poço da EBAB escavado.

A execução segue uma metodologia ascendente, com perfuração prévia até a cota de base das colunas e posterior retirada da haste durante o jateamento, com controle simultâneo de rotação e velocidade de avanço. Essa técnica possibilita a criação de elementos com função estrutural e impermeabilizante, adaptando-se a solos heterogêneos e com presença de água.

No contexto da EBAB, o Jet Grouting foi projetado para cumprir dupla função: (i) conter as paredes da escavação profunda e (ii) formar um tampão de fundo contínuo, reduzindo o risco de subpressão e rupturas hidráulicas. A elevada adaptabilidade da técnica às condições de solo e à geometria da escavação permitiu sua execução com precisão, sem interferência de escoramentos internos, otimizando o espaço operacional e a segurança do processo executivo.

4 DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÕES DA SOLUÇÃO

O sistema de Jet Grouting foi dimensionado com base em colunas de solo-cimento com 1,2 m de diâmetro médio, dispostas em linhas secantes, com espaçamento e sobreposição projetados para garantir a continuidade do corpo estanque. As colunas atuam como elementos de contenção lateral e de vedação vertical, formando um bloco monolítico de baixa permeabilidade ao redor do perímetro da escavação do poço. A dosagem inicial contou com uma relação água/cimento de 0,45 e um consumo mínimo de cimento de 360kg/m³, objetivando um módulo de elasticidade na idade de desforma de 35Gpa e um fck de 40Mpa.

Foram realizados ensaios preliminares de colunas-teste, submetidas a sondagens rotativas e ensaios de compressão simples, com o objetivo de aferir os parâmetros mecânicos alcançados e validar os critérios de projeto. A resistência à compressão obtida nas amostras superou os valores mínimos exigidos para estabilidade global e para atuação como barreira hidráulica.

As análises de estabilidade foram conduzidas por meio de modelagens em equilíbrio limite, contemplando verificações de cisalhamento global, tração e subpressão, verificações essas apresentadas com maior detalhe em Floriano e Canterelli (2022). Para avaliação do fluxo subterrâneo, foi utilizado modelo numérico simplificado em MEF, considerando camada homogênea com permeabilidade média obtida em ensaios de campo. O modelo foi calibrado a partir de leituras iniciais de nível d'água em piezômetros instalados no entorno, de modo a reproduzir os gradientes hidráulicos observados durante a fase pré-execução. Essa abordagem permitiu avaliar a redução de permeabilidade promovida pelo Jet Grouting e validar a segurança contra ruptura de fundo. As verificações de projeto, apresentadas na Figura 4, contemplaram análises mecânicas e hidráulicas. As verificações mecânicas consideraram a resistência mobilizada pelas diferentes camadas de solo, com base nos parâmetros obtidos em ensaios de campo e laboratório. Para a simulação de fluxo subterrâneo, foi adotado um modelo numérico em MEF, simplificado para uma camada homogênea com permeabilidade média representativa. Essa abordagem permitiu avaliar o desempenho global da barreira de Jet Grouting frente aos gradientes hidráulicos atuantes, assegurando a segurança contra surgência e ruptura de fundo.

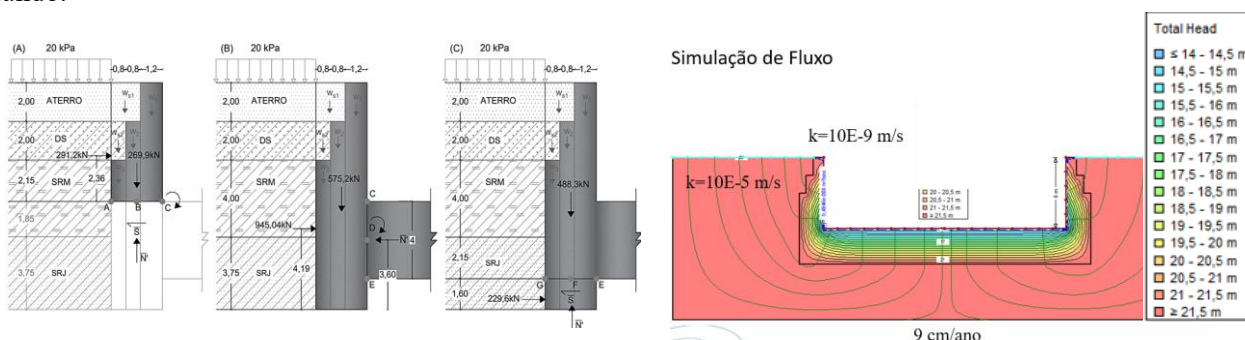


Figura 4: Verificações de projeto.

5 EXECUÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

A primeira etapa de projeto foi a execução de um sistema de proteção contra cheias, posteriormente, iniciou-se a execução das colunas de Jet Grouting, com início na perfuração dos furos até a cota de projeto, dispostos segundo o arranjo geométrico de colunas secantes. Em seguida, foi realizada a injeção ascendente de calda de cimento sob pressão, para cada coluna, promovendo a desestruturação do solo natural e sua mistura com o ligante cimentício. O controle simultâneo da rotação da haste e da taxa de avanço permitiu a formação de colunas homogêneas, com diâmetro médio de 1,2 m, tanto nas paredes laterais quanto na base da escavação. A conformação das colunas garantiu a continuidade da barreira estanque e sua função de contenção. Após a execução, foram conduzidos ensaios de controle tecnológico, como sondagens rotativas e ensaios de

compressão simples, que comprovaram os parâmetros de resistência especificados em projeto. Com os resultados satisfatórios, procedeu-se à escavação controlada do poço, acompanhada por instrumentação geotécnica, que monitorou deslocamentos e variações do nível d'água ao longo da escavação. A Figura 5 apresenta a proteção de margem provisória (dique) com ao terro projetado para início do Jet Grouting.

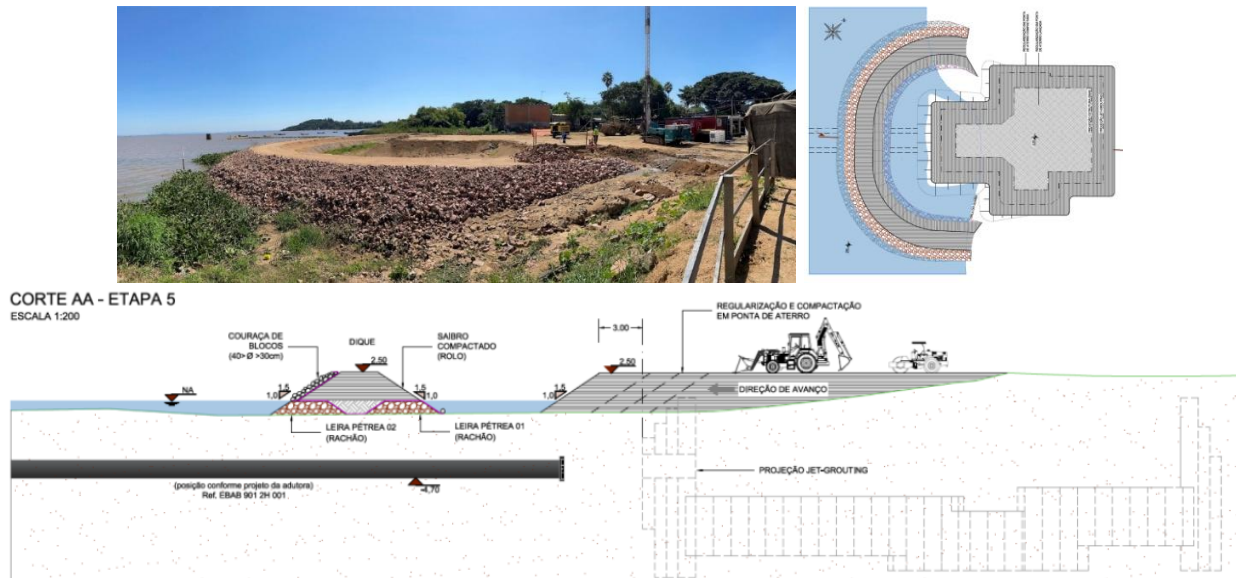


Figura 5: Dique de proteção da obra.

6 CONTROLE DE QUALIDADE DA OBRA

O controle de qualidade da obra foi realizado por meio da definição prévia de amostras do expurgo da pasta de cimento, conforme apresentado na Figura 6, por região. Os CPs moldados foram submetidos a ensaios de compressão simples em idades de 7 e 28 dias, conforme exemplifica o quadro na Figura 6. Esses pontos foram selecionados estrategicamente para representar diferentes regiões da área tratada, assegurando a uniformidade do tratamento. O fator a/c variou de 0,8 a 2,0, calibrado durante a obra.

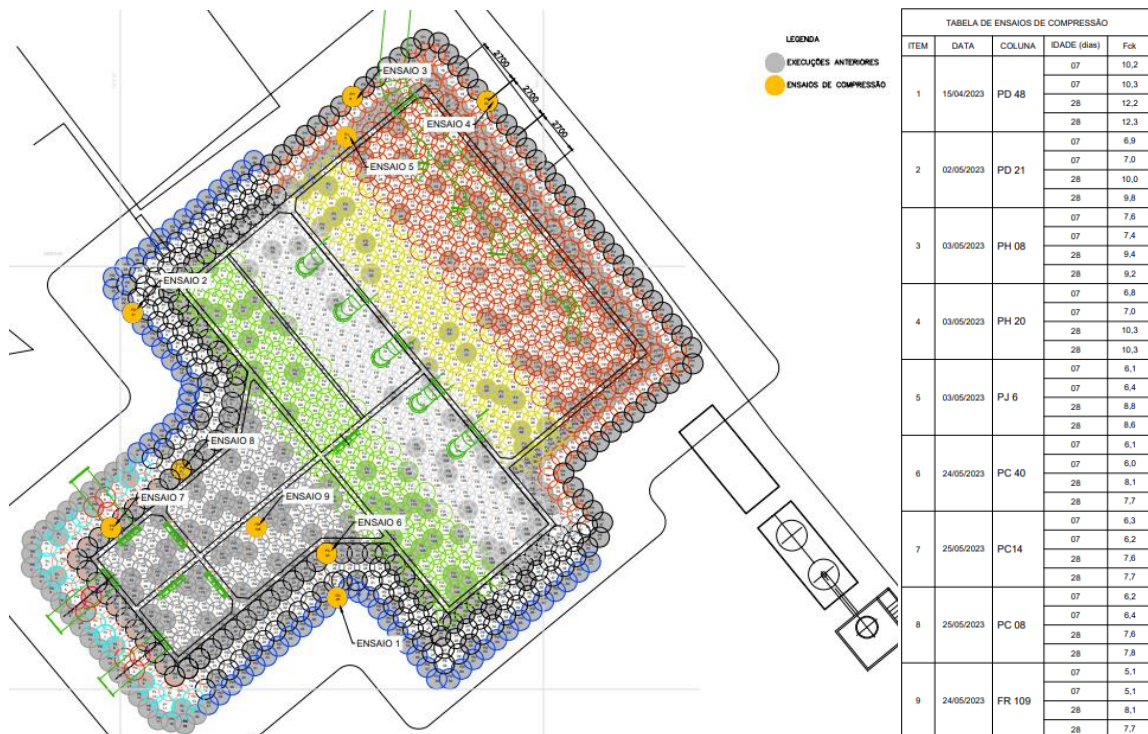


Figura 6: Plano de controle de qualidade da obra.

Importante complementar que posteriormente a extração de copos de prova das colunas testes, essas foram submetidas a ensaios de compressão simples, com idade de 21 dias. Foram rompidas apenas uma bateria de ensaios. A Figura 7 mostra o resultado do conjunto de amostras rompidas e algumas amostras. Nota-se um crescimento expressivo de resistência em toda a camada, uma vez que o melhoramento se deu em solos muito moles. Os CPs foram rompidos no laboratório de Engenharia Construção Civil da PUCRS (SANTOS, 2023).



FURO 1			
MATERIAL	PROFUNDIDADE	AMOSTRA	RCS APÓS JETGROUTING (MPa)
Aterro	0,0-1,5m	1A	1,0
Argila plástica	1,5-3,5m	1B	-
Contato transição	3,5-4,0m	1C	4,0
Solo residual	4,0-8,0m	1D	5,5
			3,5

FURO 2			
MATERIAL	PROFUNDIDADE	AMOSTRA	RCS APÓS JETGROUTING (MPa)
Aterro	0,0-1,5m	1A	2,5
Argila plástica	1,5-3,5m	1B	5,0
Contato transição	3,5-4,0m	1C	4,0
Solo residual	4,0-8,0m	1D	2,5
			3,5

FURO 3			
MATERIAL	PROFUNDIDADE	AMOSTRA	RCS APÓS JETGROUTING (MPa)
Aterro	0,0-1,5m	1A	3,0
Argila plástica	1,5-3,5m	1B	1,0
Contato transição	3,5-4,0m	1C	2,0
Solo residual	4,0-8,0m	1D	3,0
			2,3

média das médias=	3,1
média das camadas de baixo=	4,0

Figura 7: Sequência de execução do Jet-grouting.

7 MONITORAMENTO E DESEMPENHO EM OBRA

O sistema de contenção enfrentou três eventos significativos de cheia, incluindo a cheia crítica de maio de 2024. Cabe relatar que o dique de proteção sofreu danos primários nas duas primeiras cheias, entretanto, na cheia de maio (Figura 8), houve colapso total, tendo que ser reconstruído. O dique provisório foi projetado para uma cheia de 25 anos.

Em todos os episódios, não foram observadas instabilidades nas paredes da escavação nem surgência de água pelo fundo. A utilização do Jet Grouting eliminou a necessidade de escoramentos internos ou tirantes, otimizando o espaço de trabalho e contribuindo para maior segurança, agilidade e racionalização do canteiro de obras o que proporcionou maior resiliência da obra. A Figura 8 (b) apresenta a obra no mês de maio de 2024, na cheia ocorrida, o local está completamente submerso, em comparação com (a) em tempo seco, alguns meses antes.



Figura 8: (a) foto antes as chuvas de maio, (b) foto durante das chuvas.

2025

Durante e após a execução das colunas de Jet Grouting, foi implantado um sistema abrangente de instrumentação geotécnica e topográfica, com o objetivo de monitorar continuamente o desempenho da contenção e garantir a estabilidade da escavação ao longo do tempo. A instrumentação contempla a leitura sistemática de cinco piezômetros instalados no entorno da estrutura, conforme apresentado na Figura 9 destinados ao acompanhamento do nível freático e sua variação sazonal. Como parte do controle estrutural, foram instaladas 26 miras topográficas (alvos), sendo 25 já ativas, posicionadas na crista da escavação, para monitoramento de deslocamentos tridimensionais (coordenadas X, Y e Z) nas estruturas em Jet Grouting.

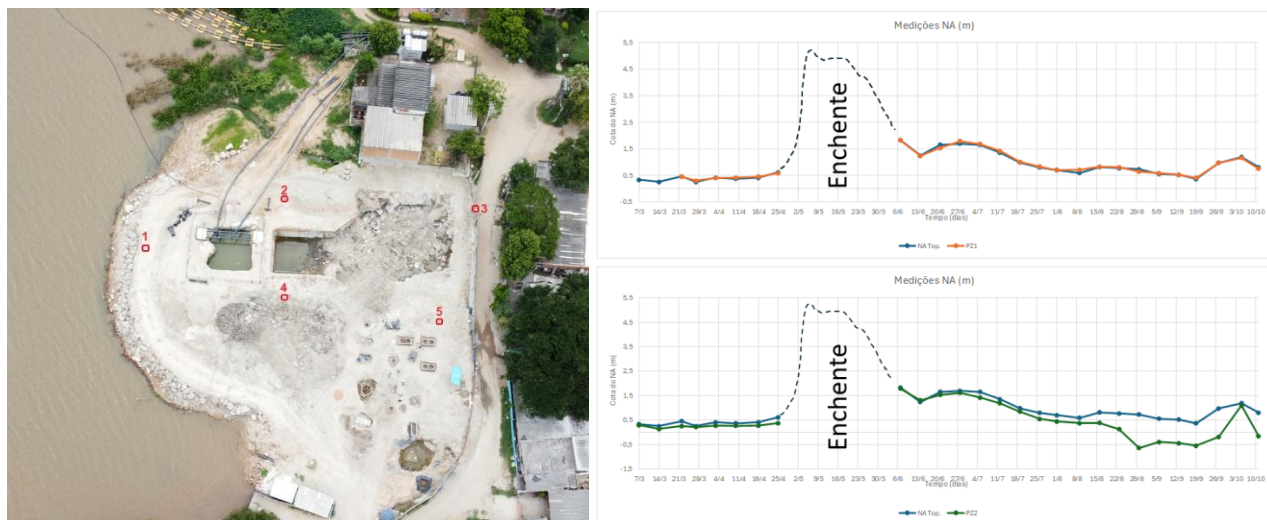


Figura 9: Pontos de monitoramento de nível d'água.

Mais de 60 medições foram realizadas com frequência quinzenal. A Figura 10 apresenta o nível d'água nos diferentes piezômetros monitorados de 07/03/2024 a 27/05/2025. As leituras apontam variações significativas do nível d'água, especialmente em eventos extremos como a cheia de maio de 2024. Com esta instrumentação, pode-se observar tendências de rupturas hidráulicas por conta de vazamentos por abertura de insertes que foram controlados e estancados em tempo. Por outro lado, os dados de deslocamentos indicam pequenas variações pontuais e transitórias, muitas vezes associadas ao erro do próprio equipamento de medição, sem tendência acumulativa ou comportamentos anômalos.

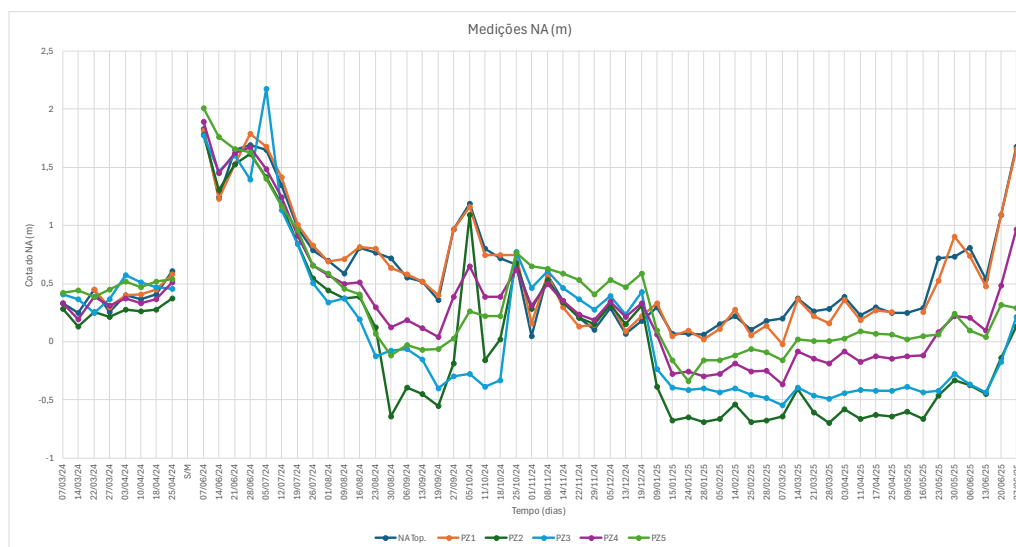


Figura 10: Variações de nível d'água de 07/03/2024 a 27/05/2025.

Os gráficos de deslocamento nas direções X, apresentados na Figura 11, mostram um exemplo de valores de leituras onde não é possível observar deslocamentos significativos das paredes da solução, sendo as variações, como citado anteriormente, possivelmente, intrínsecas as limitações do equipamento de leitura. Validando

assim a integridade da solução conforme proposto. Os gráficos de deslocamento apresentam dados de 22/01/2025 a 17/12/2025.

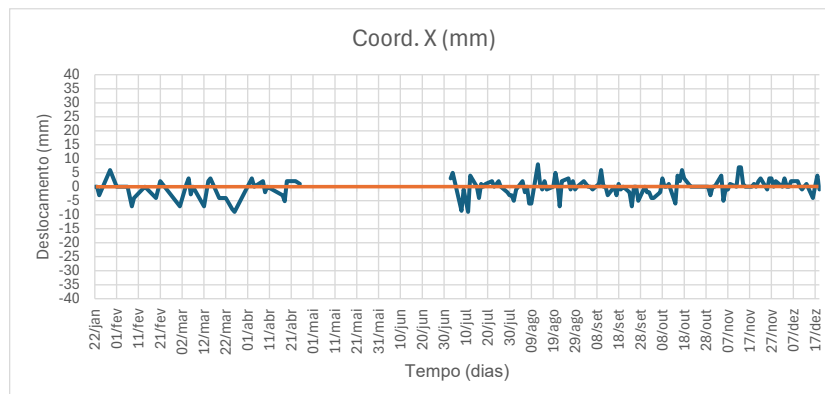


Figura 11: Deslocamento em mm do eixo x observado em uma mira em 2024.

7 CONCLUSÃO

A aplicação da técnica de Jet Grouting na Estação de Bombeamento de Água Bruta (EBAB) da Ponta do Arado demonstrou-se uma solução eficaz e tecnicamente adequada para a contenção e impermeabilização de escavações profundas em solos moles com presença de lençol freático superficial. A flexibilidade da técnica, aliada à sua capacidade de formar colunas com propriedades mecânicas e hidráulicas controladas, permitiu enfrentar com segurança os desafios geotécnicos impostos pelo terreno da obra, especialmente em relação à estabilidade das paredes e à prevenção de ruptura de fundo por subpressão.

A execução das colunas secantes e do tampão de fundo foi realizada com controle tecnológico rigoroso e monitoramento geotécnico contínuo, resultando em um sistema de contenção com desempenho satisfatório mesmo sob condições críticas, como as cheias de maio de 2024. A ausência de deslocamentos significativos, apesar das variações acentuadas no nível d'água, evidencia a robustez da solução implantada.

Além da segurança proporcionada, a adoção do Jet Grouting permitiu a eliminação de escoramentos internos e a racionalização do espaço no interior da escavação, otimizando os processos construtivos. A experiência bem-sucedida no presente projeto reforça o potencial da técnica para obras em contextos geotécnicos adversos, consolidando sua aplicabilidade em obras de infraestrutura hídrica urbana. Foi constatada uma incomensurável resiliência sob aspectos construtivos na aplicação da técnica naquele cenário de frequente impacto climático. Conta-se também com a capacidade de estanqueidade desse tipo de estrutura, um frequente problema que promove degradação das estruturas deste tipo quando executadas através de métodos tradicionais (cortinas) menos estaques.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à SF Engenharia, DMAE, o consórcio construtor, a PUCRS, e todo os entes e instituições envolvidos nesse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Floriano, Cleber de F.; Cantarelli, Rothiele D. (2022). Escavação com contenção em Jet Grouting para uma Estação de Bombeamento de Água Bruta. In. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - VIII COBRAE, Recife. *Anais...* ABMS.
- Santos, Matheus R. (2023) *Análise de desempenho de colunas de jet-grouting: estudo de caso na EBAB Ponta do Arado*. Trabalho de conclusão da especialização em Patologia e Manutenção das Edificações, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul / PUCRS.